Dark matter and small scale structure

Jinn-Ouk Gong

APCTP, Pohang 790-784, Korea

IWPPC2 Fo-Guang-Shan, Kaohsiung 10th October, 2014

590

Based on K.-Y. Choi, JG and C. S. Shin, in preparation

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| Outling | | | |
| Outline | | | |









Dark matter and small scale structure

3 Jinn-Ouk Gong

イロト イ団ト イヨト イヨト

590

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|-----------------|-------|---------|-------------|
| •0 | 00000 | 000 | 0 |
| Why before BBN? | | | |

Cosmic history seems to be well established:

- (Presumably) inflation
- Standard model particles through reheating
- Hierarchical structure formation

However we do not understand all the detail, especially ...

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|-----------------|-------|---------|-------------|
| •0 | 00000 | 000 | 0 |
| Why before BBN? | | | |

Cosmic history seems to be well established:

- (Presumably) inflation
- Standard model particles through reheating
- Itierarchical structure formation

However we do not understand all the detail, especially ...

- Post-inflationary epoch before BBN, including reheating
- An important bridge between SM and BSM
- Typically includes thermal equilibrium interactions
- Model-dependent features are swept away
- No direct observational probe

Is there no way to study this dark age?

イロト 人間 トイヨト イヨト

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-----------------|---------|-------------|
| 0• | 00000 | 000 | 0 |
| Why small so | cale structure? | | |

Nevertheless we can do something:

- Reheating sets a characteristic scale: the onset of standard RD
- Scales smaller than $k_{\rm RD}$ experiences non-thermal evolution
- Evolution of δ_m depends on thermal properties of DM
- Abundance of small scale structure depends on δ_m
- These objects (e.g. compact DM haloes) can be observed in various ways
- Q: How is the formation of small scale structure dependent on
- thermal properties of DM and
- Inon-thermal history before BBN?

イロト イポト イヨト イヨト

| TATLE als later of a | fDM to conside | | |
|----------------------|----------------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |

Which kind of DM to consider?

We consider 2 DM species

- WIMPs
 - Initially in thermal equilibrium
 - Chemical decoupling (number density conserved) and freeze out when non-rel: $M/T_{\rm CD} \sim \mathcal{O}(20)$
 - Kinetic decoupling (no more energy/momentum exchange with thermal plasma) when $T_{\text{KD}} = \mathcal{O}(1 10) \text{ MeV}$
- 2 E-WIMPs
 - Not in thermal equilibrium due to small interactions
 - No chemical or kinetic decoupling

Evolution of δ_m crucially depends on these DM thermal properties

イロト イポト イヨト イヨト

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|------------------|-------------------|---------|-------------|
| 00 | 0000 | 000 | 0 |
| Community of the | | | |
| Governing | nteractions for w | IMPS | |

Consider a non-rel scalar ϕ (e.g. osc inflaton) is decaying into DM and radiation

$$\phi \rightarrow \begin{cases} \text{DM with branching ratio } f_m \\ \text{radiation with branching ratio } 1 - f_m \end{cases}$$

Governing eqs (BG and pert) can be derived from the Boltzmann eq with 3 interactions between non-rel scalar χ and radiation γ :

| $\chi \leftrightarrow \gamma + \gamma$ | (decay; $\chi = \phi$) |
|---|--|
| $\chi + \chi \leftrightarrow \gamma + \gamma$ | (creation/annihilation; $\chi = WIMPs$) |
| $\chi + \gamma \leftrightarrow \chi + \gamma$ | (scattering; $\chi = WIMPs$) |

Interpreting ϕ , WIMPs and radiation as fluid components with $w_{\phi} = w_m = 0$ and $w_r = 1/3$ we can write the complete set of eqs

・ ロ ト ・ 同 ト ・ 三 ト ・ 三 ト

| Introduction | WIMPs | | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|-----|---------|-------------|
| 00 | 00000 | | 000 | 0 |
| T. 1 | | 1 . | | |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ;



Dark matter and small scale structure

Jinn-Ouk Gong

nan

| Introduction | WIMPs | | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|-----|---------|-------------|
| 00 | 00000 | | 000 | 0 |
| T. 1 | .1 | 1 . | | |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

• remain super-horizon even after reheating



Dark matter and small scale structure

Jinn-Ouk Gong

| Introduction | WIMPs | | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|-----|---------|-------------|
| 00 | 00000 | | 000 | 0 |
| T. 1 | .1 | 1 . | | |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

- remain super-horizon even after reheating
- enter the horizon during RD after kinetic decoupling



| n 1 (* * | | | |
|--------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 0000 | 000 | 0 |
| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

- remain super-horizon even after reheating
- enter the horizon during RD after kinetic decoupling
- enter the horizon during RD before kinetic decoupling



| T 1 (* * | (1 1 | • | |
|--------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

- remain super-horizon even after reheating
- enter the horizon during RD after kinetic decoupling
- enter the horizon during RD before kinetic decoupling
- enter the horizon before RD, i.e. when ϕ dominates (SD)



| Trealection in a set the sum all conjugate | | | | |
|--|-------|---------|-------------|--|
| 00 | 00000 | 000 | 0 | |
| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions | |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

- remain super-horizon even after reheating
- enter the horizon during RD after kinetic decoupling
- enter the horizon during RD before kinetic decoupling
- enter the horizon before RD, i.e. when ϕ dominates (SD)

Non-trivial shape of $\delta_m(k)$ dep on when a mode enters the horizon



| Trealection in a set the sum all conjugate | | | | |
|--|-------|---------|-------------|--|
| 00 | 00000 | 000 | 0 | |
| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions | |

WIMPs are mainly produced from thermal plasma rather than direct decay of ϕ ; for pert, 4 different regimes: modes that...

- remain super-horizon even after reheating
- enter the horizon during RD after kinetic decoupling
- enter the horizon during RD before kinetic decoupling
- enter the horizon before RD, i.e. when ϕ dominates (SD)

Non-trivial shape of $\delta_m(k)$ dep on when a mode enters the horizon



| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |

Formation of collapsed objects

Compact DM haloes within $\delta_{\min} \sim 10^{-3} \lesssim \delta_m \lesssim \delta_{\max} \sim 0.3$

• Seed mass of compact haloes of radius R = 1/(aH)

$$M_{i} = \frac{4\pi}{3} \rho_{m} H^{-3} \Big|_{aH=1/R} \approx 1.30 \times 10^{11} \left(\frac{\Omega_{m0} h^{2}}{0.112}\right) \left(\frac{R}{\text{Mpc}}\right)^{3} M_{\odot}$$

Mass of a compact halo today

$$M_0 = \frac{z_{\rm eq} + 1}{z + 1} M_i \bigg|_{z_{\rm eq} = 3600, z = 10} \approx 4 \times 10^{13} \left(\frac{R}{\rm Mpc}\right)^3 M_{\odot}$$

Solution of compact haloes with mass $\gtrsim M_0$ in Milky Way

$$f \equiv \frac{\Omega_{m0}}{\Omega_{m0} + \Omega_{b0}} \frac{M_0}{M_i} \beta(R) \text{ w/ } \beta(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(R)}} \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} d\delta_m e^{-\delta_m^2/[2\sigma^2(R)]}$$
$$\sigma^2(R) = \int_0^\infty \frac{dk}{k} W^2(kR) \mathscr{P}_{\delta}(k)$$

イロト イポト イヨト イヨト

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|----------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| ~ · · · | | | |

Constraints on primordial power spectrum

Thus 2 inputs to constrain the primordial power spectrum:

- determining δ_{\min} : value of δ_m at horizon entry which gives $\delta_m = \delta_c \approx 1.686$ at a given redshift z_c
- ② constraining $\sigma(R)$: from non-obs from e.g. Fermi-LAT



| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|------------------|---------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| C · · · · | 1. 1. 1 | | |

Constraints on primordial power spectrum

Thus 2 inputs to constrain the primordial power spectrum:

- determining δ_{\min} : value of δ_m at horizon entry which gives $\delta_m = \delta_c \approx 1.686$ at a given redshift z_c
- ② constraining $\sigma(R)$: from non-obs from e.g. Fermi-LAT

 $\sigma_{\max}(k)$ is directly translated into the bound on the primordial power spectrum on small scales unconstrained by the CMB





Evolution with E-WIMPs

Perturbation in E-WIMPs follow standard evolution $(\Omega_{WIMP} : \Omega_{E-WIMP} = 1 : 2)$



nar



Evolution with E-WIMPs

Perturbation in E-WIMPs follow standard evolution $(\Omega_{WIMP} : \Omega_{E-WIMP} = 1 : 2)$



1

• • • • • • • • • • • • •



Perturbation in E-WIMPs follow standard evolution $(\Omega_{\text{WIMP}}: \Omega_{\text{E-WIMP}} = 1:2)$



Perturbations in WIMPs and E-WIMPs are different on small scales, and follow each other (c.f. δ_b follows δ_m after recombination)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >



Perturbation in E-WIMPs follow standard evolution $(\Omega_{WIMP} : \Omega_{E-WIMP} = 1 : 2)$



Perturbations in WIMPs and E-WIMPs are different on small scales, and follow each other (c.f. δ_b follows δ_m after recombination)

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|-----------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| Modified bounds | | | |

Bound on $\sigma_{\max}(k)$ and correspondingly $\mathscr{P}_{\mathscr{R}}(k)$ is modified: somewhat milder...



N.B. This bound is obtained by considering total DM perturbation

QA

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|------------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | 0 |
| More to consider | | | |

But we have not yet taken into account a few important issues:

- Free streaming of WIMPs: sharp cutoff at ~ 1 pc, below which δ_m is suppressed due to free streaming
- Gamma rays only from WIMPs: (non-)observation of gamma rays puts bound on WIMPs, not E-WIMPs
- Non-Gaussian distribution: sensitive to modifications at high tail region

$$\beta(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} dy \, e^{-y^2/2} \left[1 + \frac{w_s^{(3,0)}}{6} H_3(y) + \cdots \right]$$

where $w_s^{(3,0)} \approx 3 - 3.3 \times 10^{-4} f_{\text{NL}}$ and $H_3(x) = x^3 - 3x$

< ロ > < 同 > < 三 > < 三 > -

| Introduction | WIMPs | E-WIMPs | Conclusions |
|--------------|-------|---------|-------------|
| 00 | 00000 | 000 | • |
| Conclusions | | | |

- Formation of small scale structure formation depends on
 - thermal properties of DM: enhancement of δ_m on small scales
 - non-thermal history before BBN: SD, kinetic decoupling...
- Profile of δ_m at the onset of standard RD can be non-trivial
- Observations on compact haloes can constrain the primordial spectrum far beyond the scales constrained by the CMB

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >