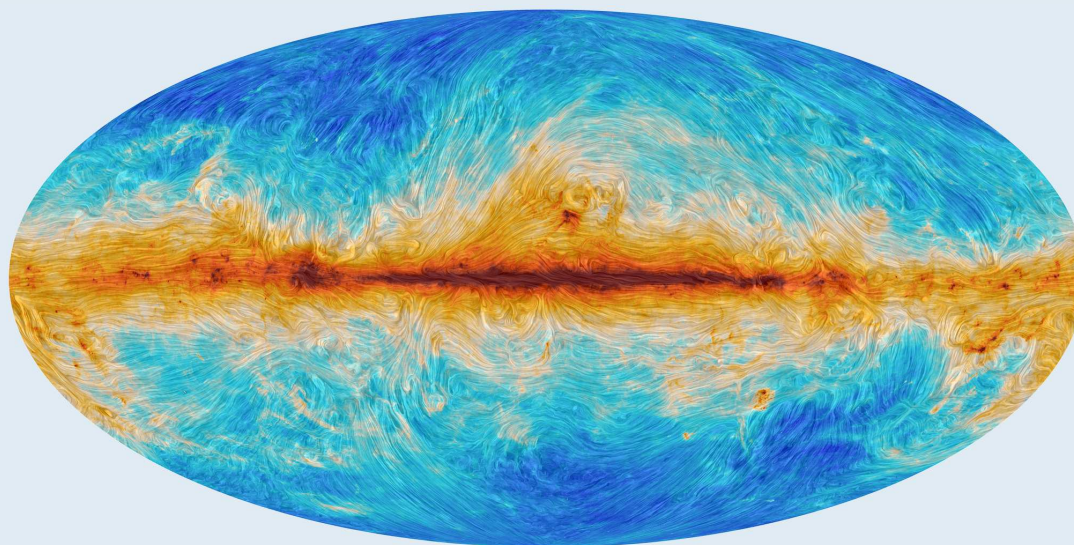

Reliktní záření a jeho polarizace

Jiří Krtička

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



Proč je obloha temná?

- v hlubohém lese bychom v každém směru měli vidět kmen stromu.



Proč je obloha temná?

- pokud jsou hvězdy rozmístěny rovnoměrně, potom bychom v každém směru měli vidět povrch hvězdy (Olbersův paradox)



Proč je obloha temná?

- důsledek konečné rychlosti světla a konečného stáří vesmíru

Proč je obloha temná?

- důsledek konečné rychlosti světla a konečného stáří vesmíru
- obloha není zcela temná, září v oboru mikrovln: *reliktní záření*

Cesta k objevu reliktního záření

- 1915 Albert Einstein: formulace obecné teorie relativity (teorie gravitace)
- 1922–32 Friedmann, Lemaître, Einstein, DeSitter: modely rozpínajícího se vesmíru
- 1929 Edwin Hubble: pozorování rozpínajícího se vesmíru
- 1948 Alpher, Gamow: horká počáteční fáze vesmíru
- 1948 Alpher, Herman: předpověď reliktního záření
- 1960 Zeldovič, Dicke: nezávislá předpověď
- 1964 Doroševič, Novikov: možnost detekce
- 1964 Dicke, Wilkinson, Roll: konstrukce radiometru
- 1964 Penzias, Wilson: objev reliktního záření

Mezníky studia reliktního záření

- 1941 Adams, McKellar: "rotační teplota" mezihvězdného prostředí 2 K
- 1954 Èmile Le Roux: radiové záření s teplotou 3 K
- 1957 Tigran Šmaonov: radiové pozadí, teplota 4 K
- 1961–3 Ohm, Jakes (Bellovy laboratoře): radiový šum
- 1992 COBE: fluktuace reliktního záření (RELIKT-1)
- 2001–10 WMAP: precizní kosmologie
- 2009–2013 PLANCK: vysoké rozlišení
- 2014 BICEP2: polarizace v důsledku prvotních gravitačních vln

Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let

Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let
- na počátku byl vesmír velmi horký, s rozpínáním se ochlazoval

Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let
- na počátku byl vesmír velmi horký, s rozpínáním se ochlazoval
- látka byla ionizovaná, stejná teplota baryonové látky a záření (udržovaná například reakcemi typu $H^+ + e^- \longleftrightarrow H + \gamma$)

Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let
- na počátku byl vesmír velmi horký, s rozpínáním se ochlazoval
- látka byla ionizovaná, stejná teplota baryonové látky a záření (udržovaná například reakcemi typu $H^+ + e^- \longleftrightarrow H + \gamma$)
- zhruba 380 000 let po velkém třesku je vesmír natolik chladný ($T \approx 3000$ K), že dochází k rekombinaci vodíku



Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let
- na počátku byl vesmír velmi horký, s rozpínáním se ochlazoval
- látka byla ionizovaná, stejná teplota baryonové látky a záření (udržovaná například reakcemi typu $H^+ + e^- \longleftrightarrow H + \gamma$)
- zhruba 380 000 let po velkém třesku je vesmír natolik chladný ($T \approx 3000$ K), že dochází k rekombinaci vodíku
- vesmír se velmi rychle stává průhledným, reliktní záření přestává interagovat s hmotou

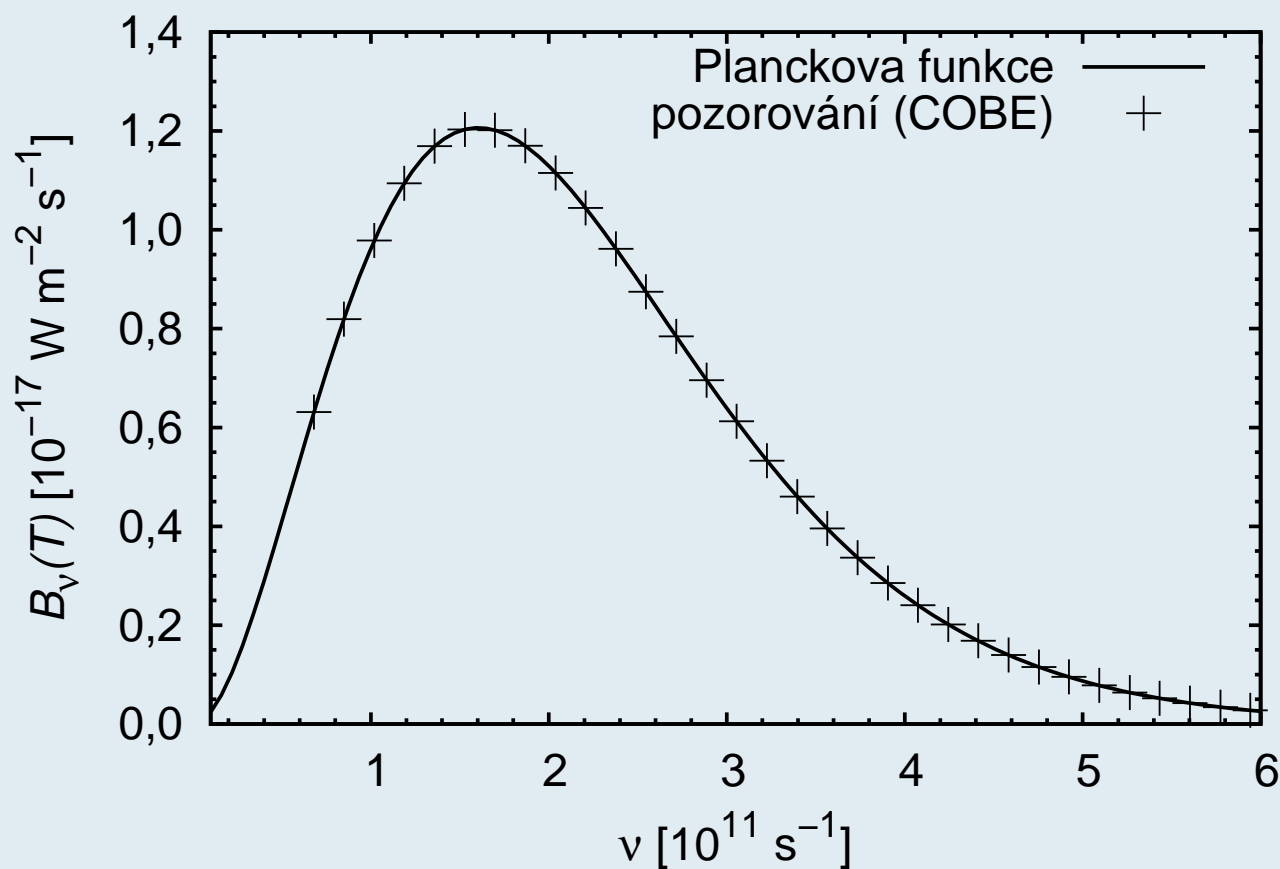
Stručná historie reliktního záření

- vesmír vznikl před $13,799 \pm 0,021 \cdot 10^9$ let
 - na počátku byl vesmír velmi horký, s rozpínáním se ochlazoval
 - látka byla ionizovaná, stejná teplota baryonové látky a záření (udržovaná například reakcemi typu $H^+ + e^- \longleftrightarrow H + \gamma$)
 - zhruba 380 000 let po velkém třesku je vesmír natolik chladný ($T \approx 3000$ K), že dochází k rekombinaci vodíku
 - vesmír se velmi rychle stává průhledným, reliktní záření přestává interagovat s hmotou
- ⇒ *reliktní záření sebou nese informaci o stavu vesmíru 380 000 let po velkém třesku*

Izotropie a teplota reliktního záření

- v době vzniku reliktního záření byl vesmír homogenní a izotropní \Rightarrow s vysokou přesností je i reliktní záření izotropní

Izotropie a teplota reliktního záření



- teplotní rozložení odpovídá Planckově funkci s teplotou $T = 2.7255 \pm 0.0006 \text{ K}$

A přece se pohybuje!

Mělo by být reliktní záření opravdu izotropní?

- Země se pohybuje kolem Slunce

A přece se pohybuje!

Mělo by být reliktní záření opravdu izotropní?

- Země se pohybuje kolem Slunce
- Slunce obíhá kolem středu Galaxie

A přece se pohybuje!

Mělo by být reliktní záření opravdu izotropní?

- Země se pohybuje kolem Slunce
- Slunce obíhá kolem středu Galaxie
- Galaxie gravitačně interaguje s galaxií M31
- Galaxie gravitačně interaguje s dalšími blízkými galaxiemi, především s kupou galaxií v Paně

A přece se pohybuje!

Mělo by být reliktní záření opravdu izotropní?

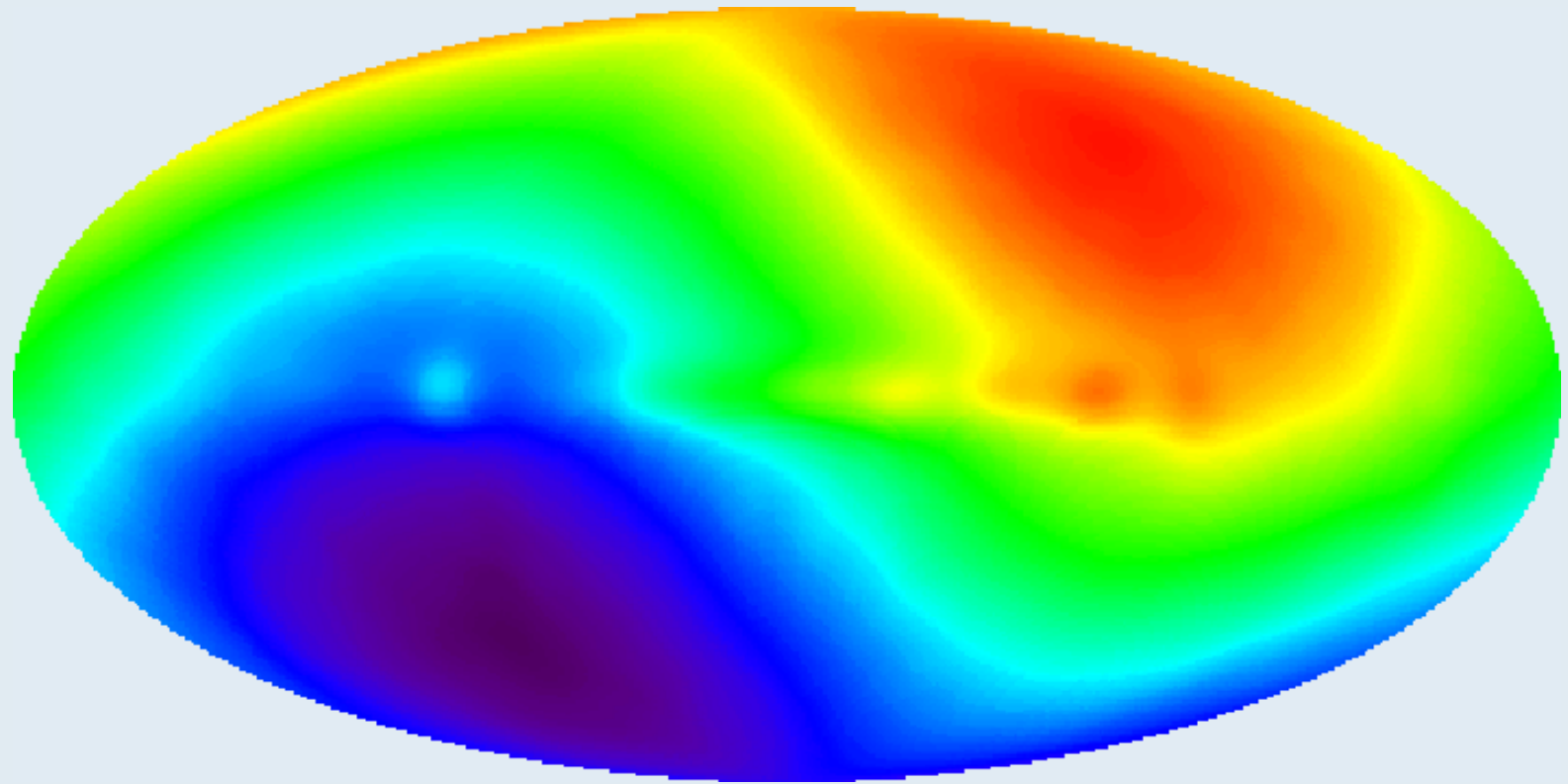
- Země se pohybuje kolem Slunce
- Slunce obíhá kolem středu Galaxie
- Galaxie gravitačně interaguje s galaxií M31
- Galaxie gravitačně interaguje s dalšími blízkými galaxiemi, především s kupou galaxií v Paně

A přece se pohybuje!

Mělo by být reliktní záření opravdu izotropní?

- Země se pohybuje kolem Slunce
 - Slunce obíhá kolem středu Galaxie
 - Galaxie gravitačně interaguje s galaxií M31
 - Galaxie gravitačně interaguje s dalšími blízkými galaxiemi, především s kupou galaxií v Paně
- ⇒ pohyb sluneční soustavy vůči "vesmírné vztažné soustavě" by měl způsobovat dipólovou anizotropii reliktního záření

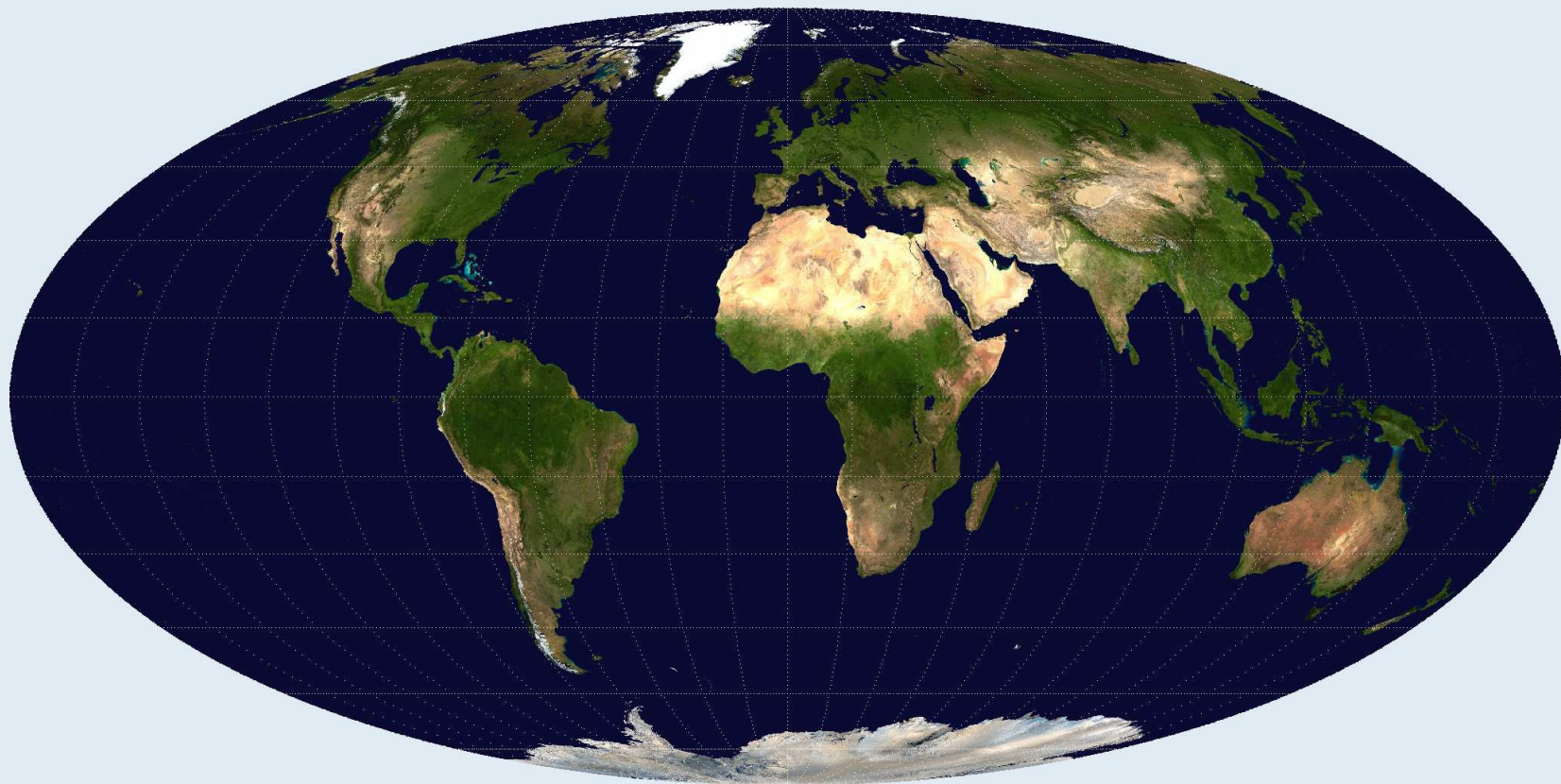
A přece se pohybuje!



- dipólová anizotropie reliktního záření, změna intenzity v řádu 10^{-3}

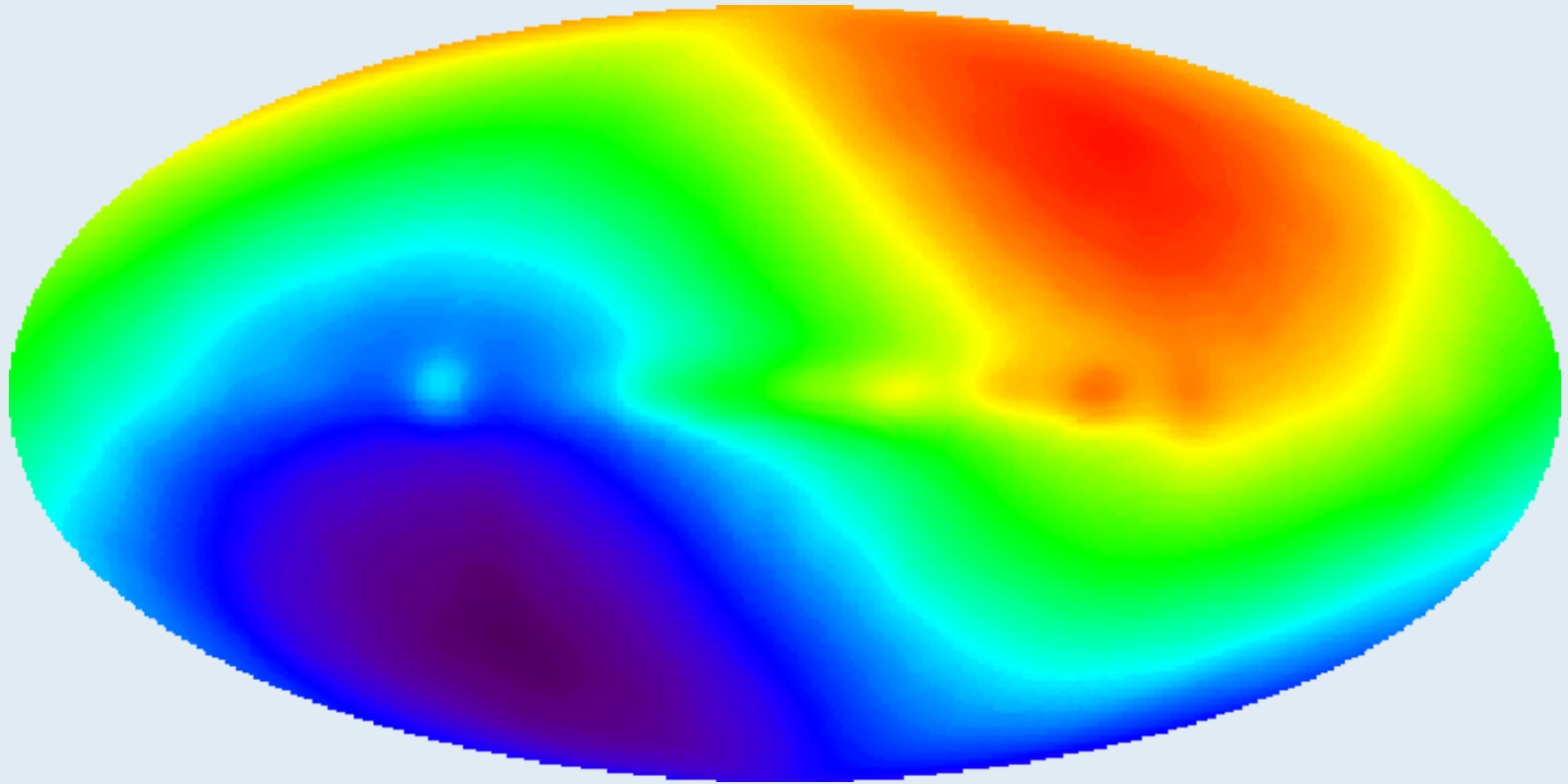
$$T(\vartheta) = T_0 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \cos \vartheta \right), \quad \frac{\Delta T}{T_0} \approx 10^{-3} \approx \frac{v}{c}$$

A přece se pohybuje!



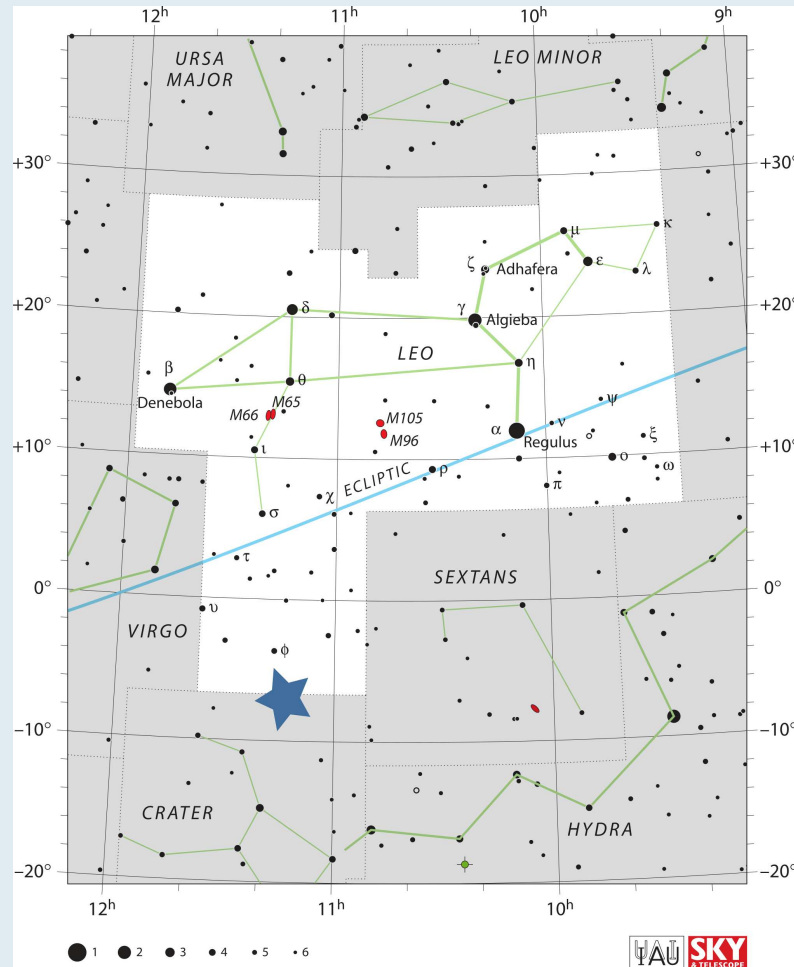
- povrch Země v tzv. Mollweidově zobrazení

A přece se pohybuje!



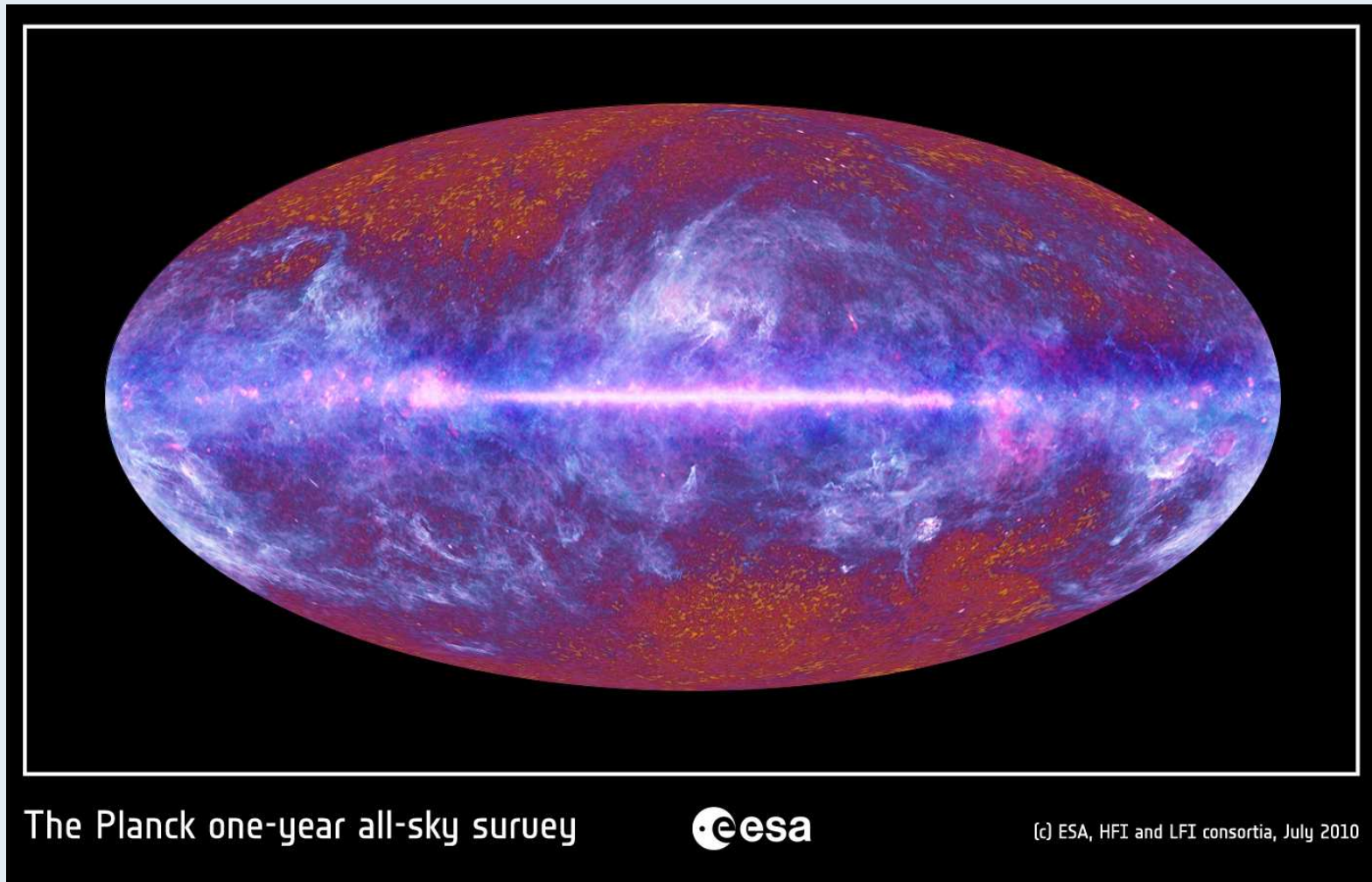
- dipólová anizotropie reliktního záření, změna intenzity v řádu 10^{-3}
- pohyb sluneční soustavy v Galaxii a Galaxie (gravitační interakce s blízkými galaxiemi)

A přece se pohybuje!



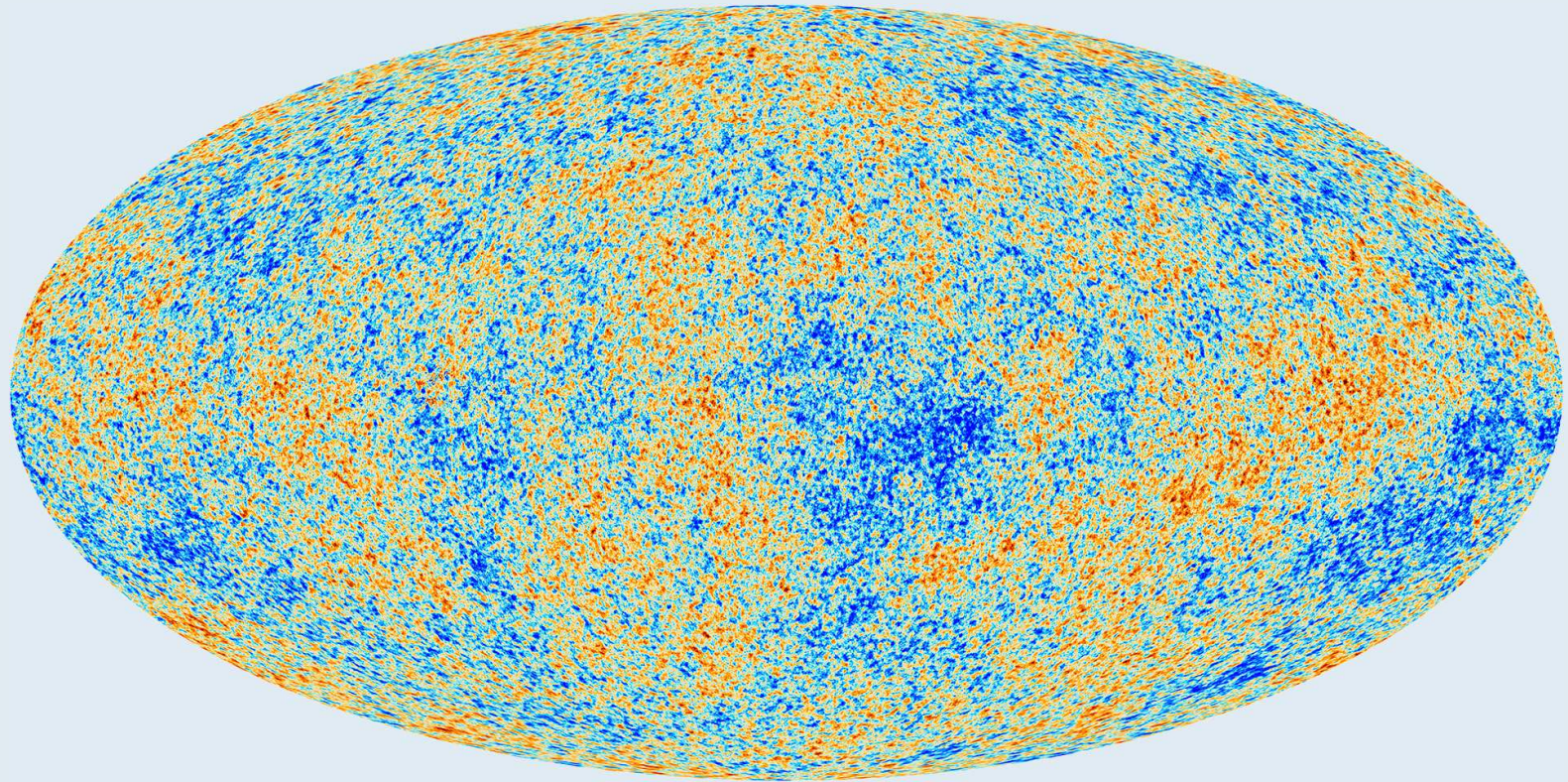
- pohyb rychlostí 369 km s^{-1} směrem k rozhraní souhvězdí Lva a Poháru (30° od kupy v Paně)

Po odečtení pohybu Slunce...



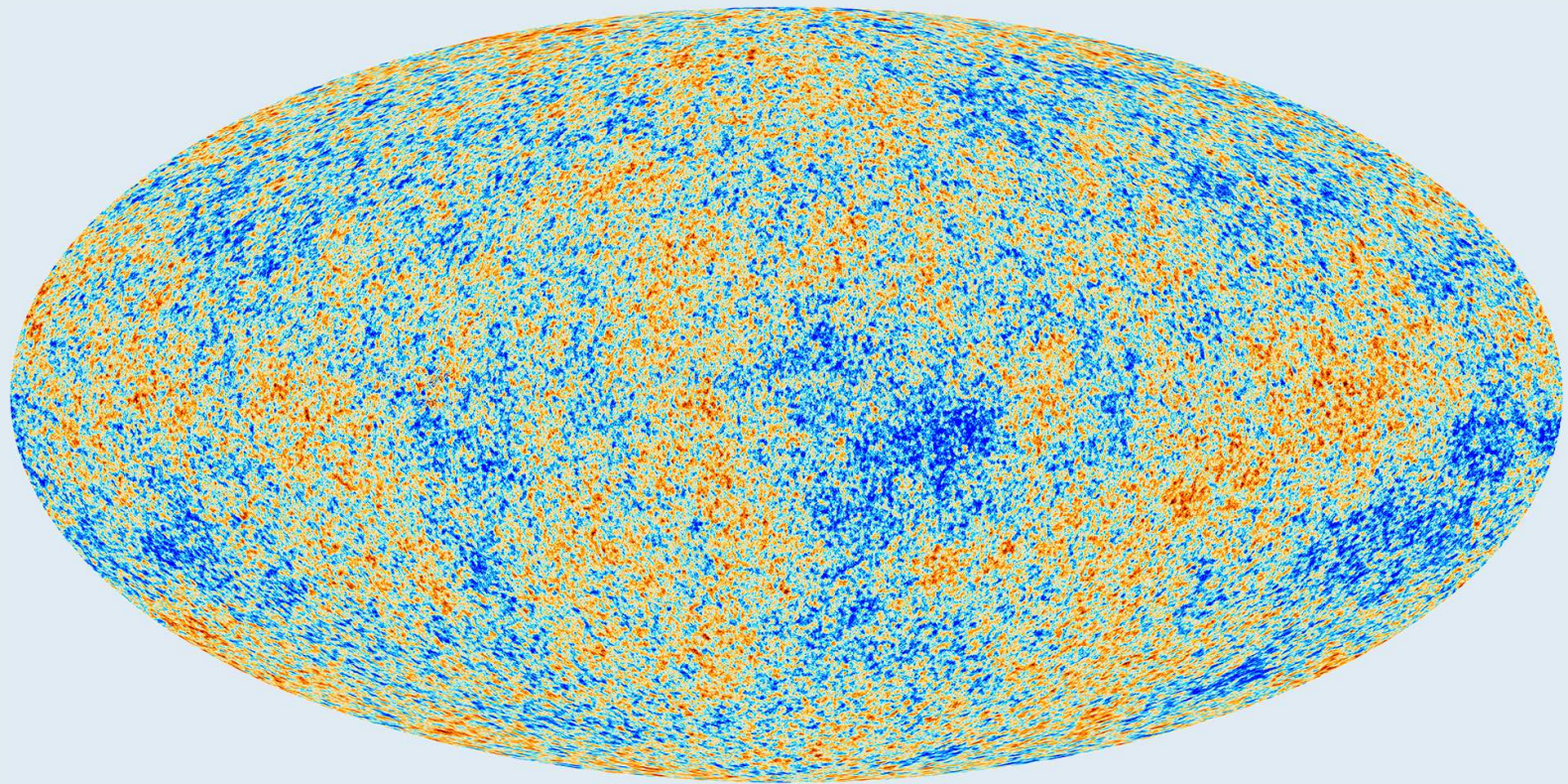
- záření mezihvězdného prachu především v rovině Galaxie

Po odečtení mezihvězdné látky...



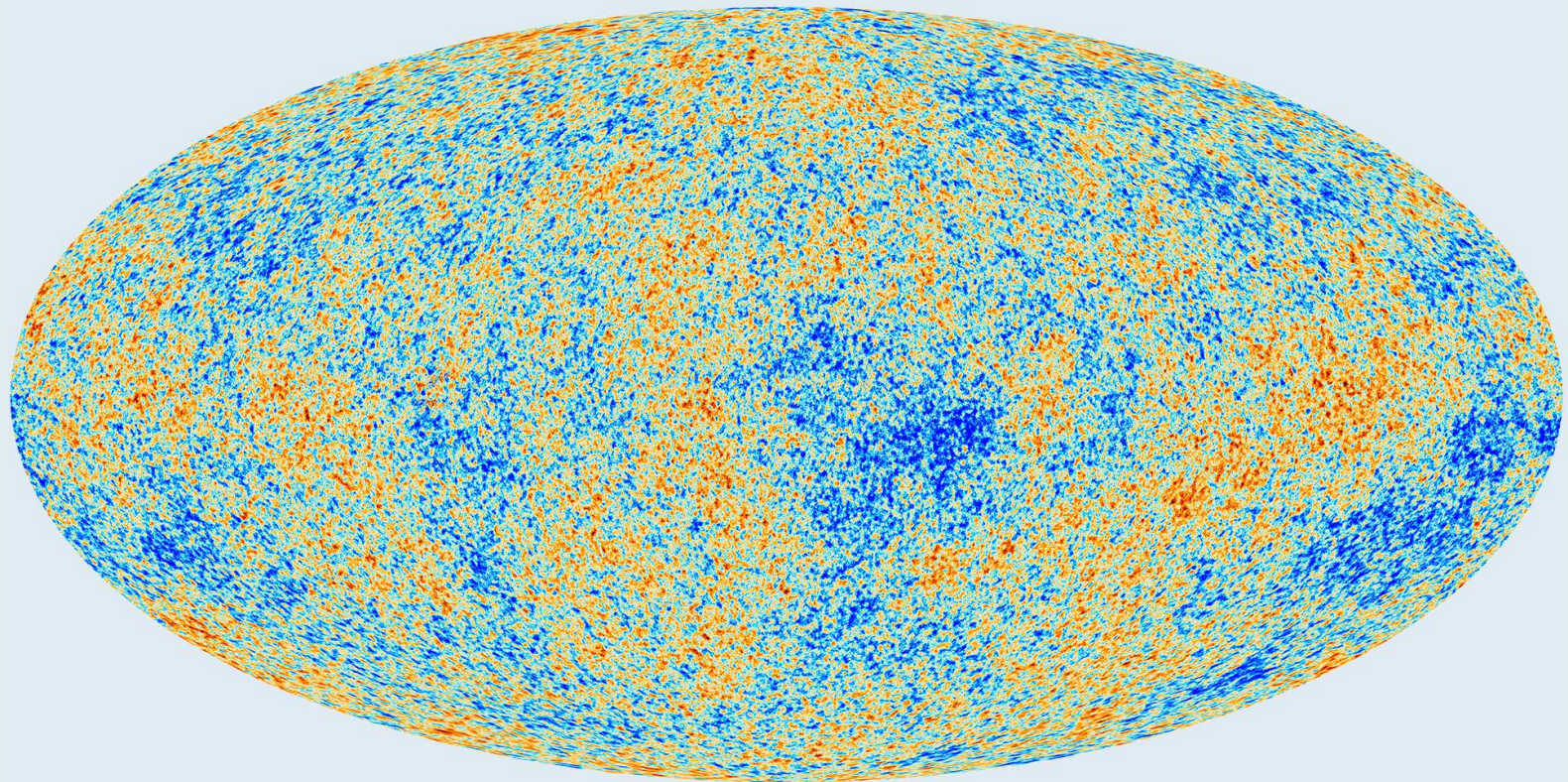
- fluktuace teploty reliktního záření,
amplituda řádově 10^{-5} K

Po odečtení mezihvězdné látky...



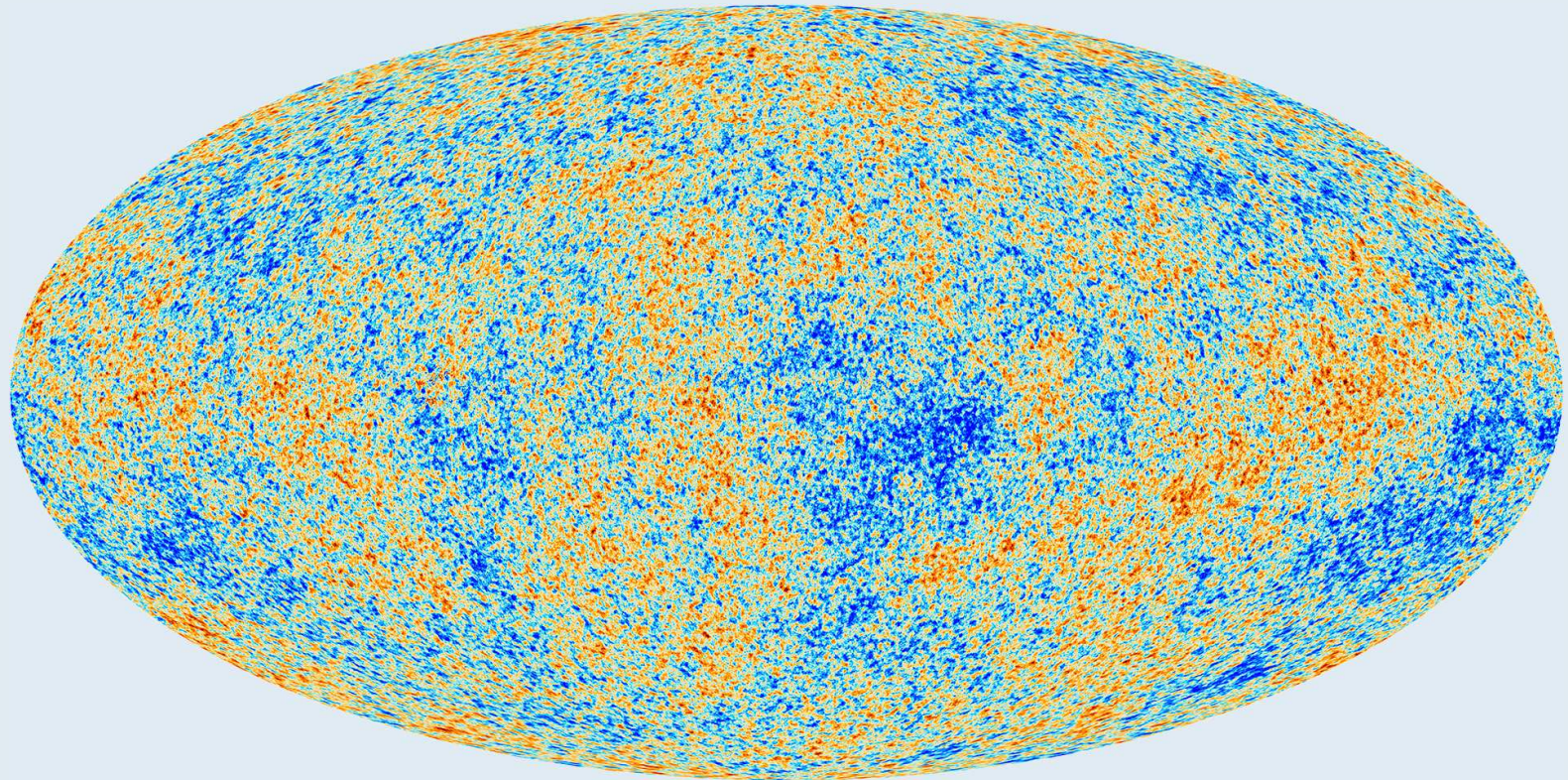
- fluktuace teploty reliktního záření
- způsobené hlavně nehomogenním rozložením hmoty (fotony procházejí místy s různým gravitačním potenciálem), *Sachsův–Wolfův jev*

Po odečtení mezihvězdné látky...



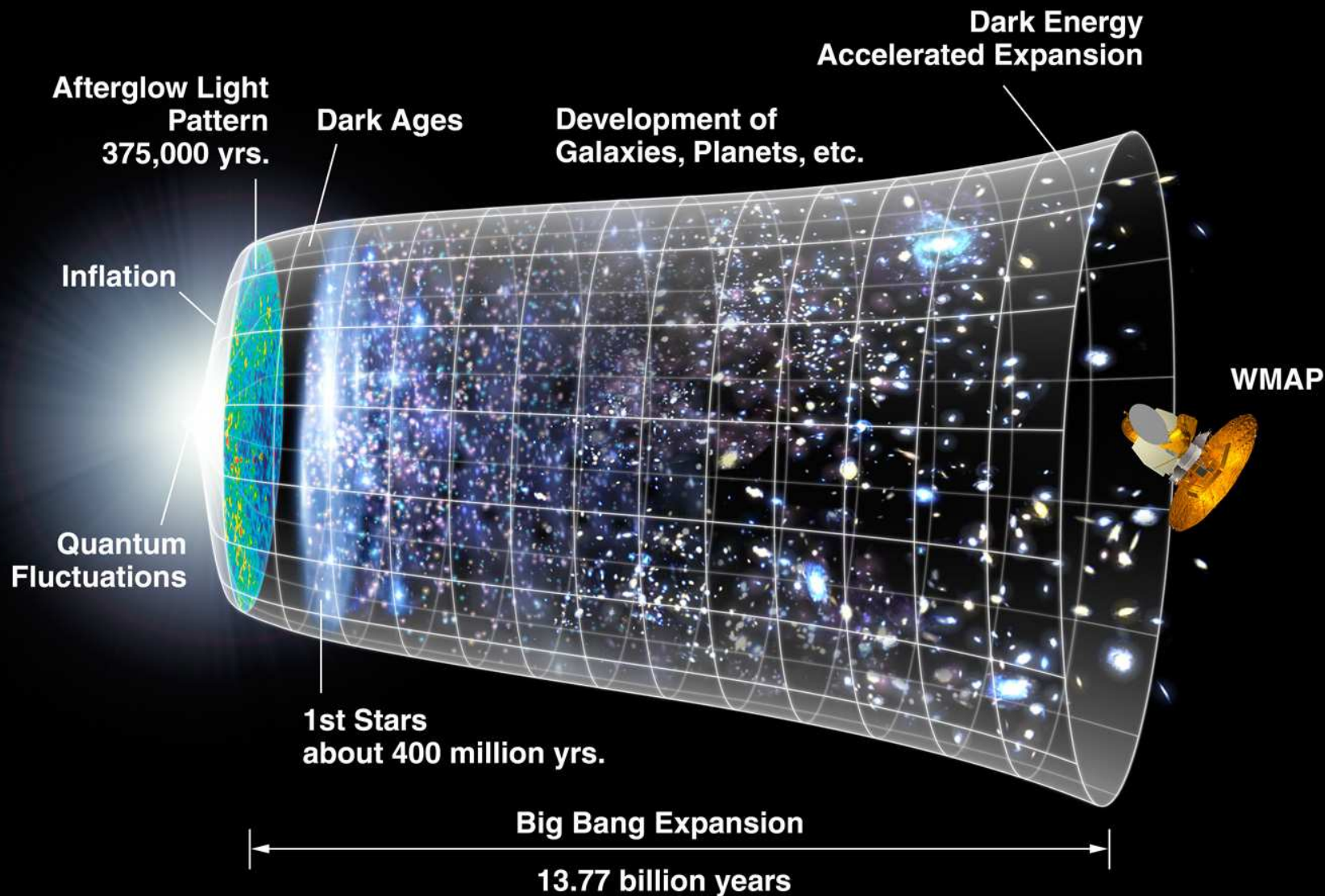
- fluktuace teploty reliktního záření
- způsobené hlavně nehomogenním rozložením hmoty: husté oblasti chladnější

Po odečtení mezihvězdné látky...

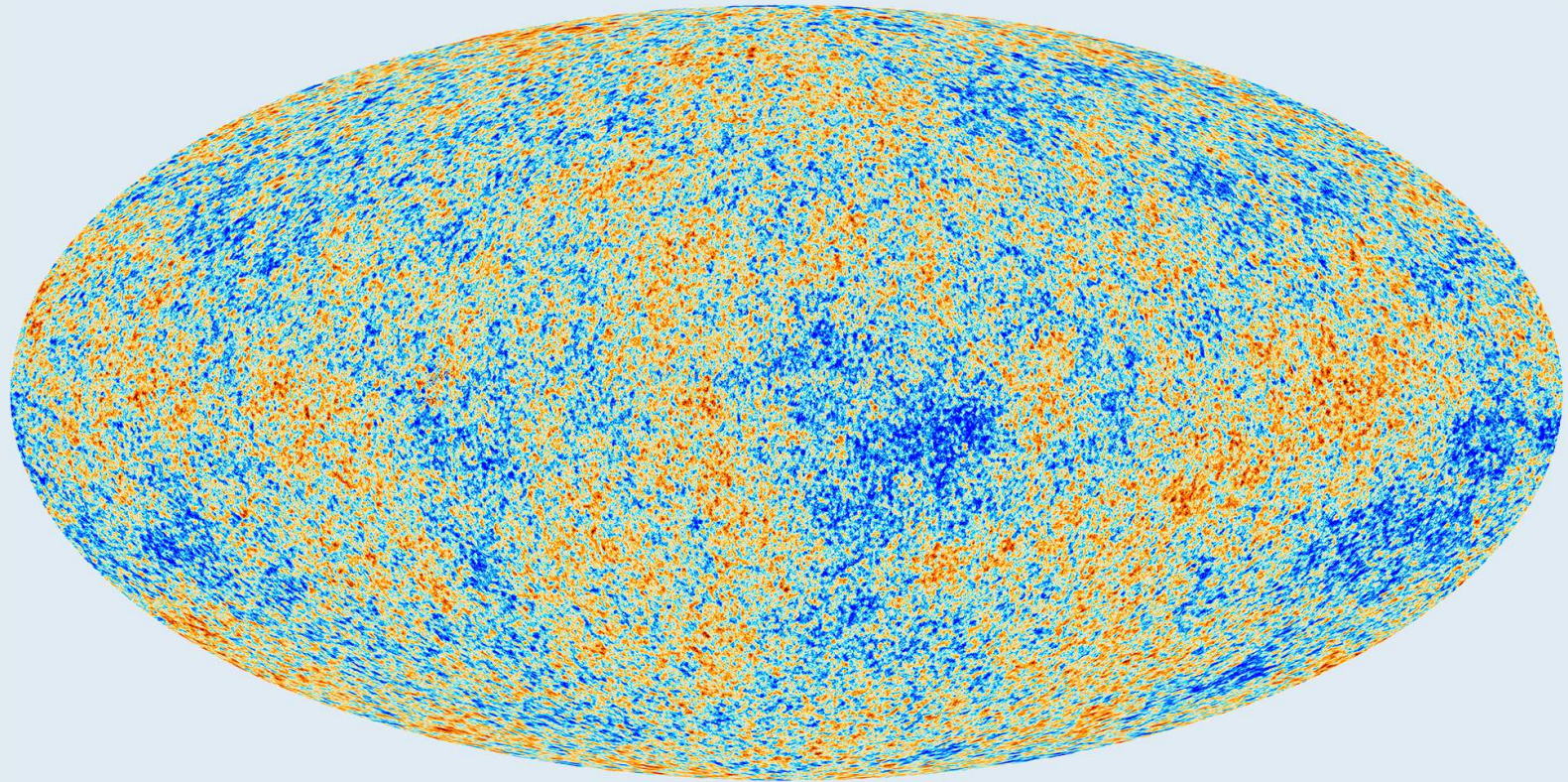


- fluktuace teploty reliktního záření
- odráží prvotní nehomogenity hustoty hmoty ve vesmíru, které daly vzniknout pozorované struktuře vesmíru

Po odečtení mezihvězdné látky...



Po odečtení mezihvězdné látky...



- fluktuace teploty reliktního záření
- nejdůležitější kosmologické pozorování

Reliktní záření ostře sledované

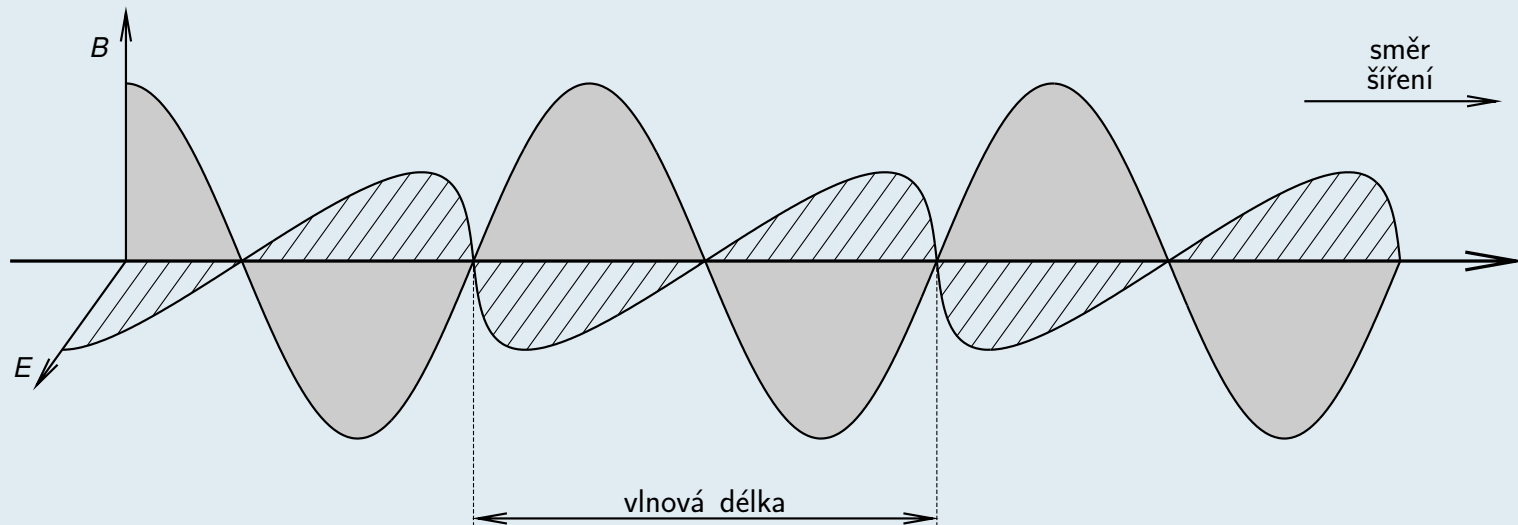
- spektrální rozložení (intenzita, teplota)
- prostorové rozložení (odchylky od izotropie, teplotní fluktuace)

Reliktní záření ostře sledované

- spektrální rozložení (intenzita, teplota)
- prostorové rozložení (odchylky od izotropie, teplotní fluktuace)
- *polarizace*

Polarizace záření

- reliktní záření je elektromagnetické záření
- kmitají vektory intenzity elektrického a magnetického pole kolmo ke směru šíření



Polarizace záření

- *polarizace* je dána orientací kmitání vektoru elektrické intenzity elektromagnetické vlny
- rozložení intenzity na dvě kolmé složky (např. E_x , E_y), fázový rozdíl mezi nimi $\Delta\varphi$
- *polarizované záření*: stálý fázový rozdíl $\Delta\varphi$, speciální případy:
 - *lineární polarizace*: $\Delta\varphi = n\pi$
 - *kruhová polarizace*: $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi/2$ (pravotočivá, levotočivá)
- *nepolarizované záření*: $\Delta\varphi$ se mění nahodile
- *částečně polarizované záření*: směs polarizovaného a nepolarizovaného záření

Polarizace: zdroj informací

- polarizace záření nese informaci o
 - zdroji záření
 - prostředí, kterým záření prochází
- většina zdrojů vydává nepolarizované světlo
- k polarizaci dochází např. odrazem, lomem, rozptylem, dvojlomem

Polarizace: zdroj informací

- polarizace záření nese informaci o
 - zdroji záření
 - prostředí, kterým záření prochází
- většina zdrojů vydává nepolarizované světlo
- k polarizaci dochází např. odrazem, lomem, rozptylem, dvojlomem
- modré světlo oblohy částečně polarizované
- optická aktivita látek: stáčení roviny polarizovaného světla: měření koncentrace
- polarizační brýle (3D obraz)

Polarizace v astronomii

- Zeemanův jev: polarizace záření v čarách v přítomnosti magnetického pole \Rightarrow měření magnetického pole
- polarizace v důsledku rozptylu záření na volných elektronech: studium asymetrických obálek hvězd

Je reliktní záření polarizované?

- zdroj záření: tepelný \Rightarrow žádnou polarizaci neočekáváme

Je reliktní záření polarizované?

- zdroj záření: tepelný \Rightarrow žádnou polarizaci neočekáváme
- polarizace v důsledku rozptylu záření na volných elektronech (mezigalaktická látka ionizovaná)

Je reliktní záření polarizované?

- zdroj záření: tepelný \Rightarrow žádnou polarizaci neočekáváme
- polarizace v důsledku rozptylu záření na volných elektronech (mezigalaktická látka ionizovaná)
 - akustické fluktuace hustoty

Je reliktní záření polarizované?

- zdroj záření: tepelný \Rightarrow žádnou polarizaci neočekáváme
- polarizace v důsledku rozptylu záření na volných elektronech (mezigalaktická látka ionizovaná)
 - akustické fluktuace hustoty
 - prvotní gravitační vlny

Je reliktní záření polarizované?

- zdroj záření: tepelný \Rightarrow žádnou polarizaci neočekáváme
- polarizace v důsledku rozptylu záření na volných elektronech (mezigalaktická látka ionizovaná)
 - akustické fluktuace hustoty
 - prvotní gravitační vlny

lineární polarizace

Polarizace reliktního záření: e^-

- rekombinace vodíku 380 000 let po velkém třesku (vznik reliktního záření): látka ve vesmíru neionizovaná

Polarizace reliktního záření: e^-

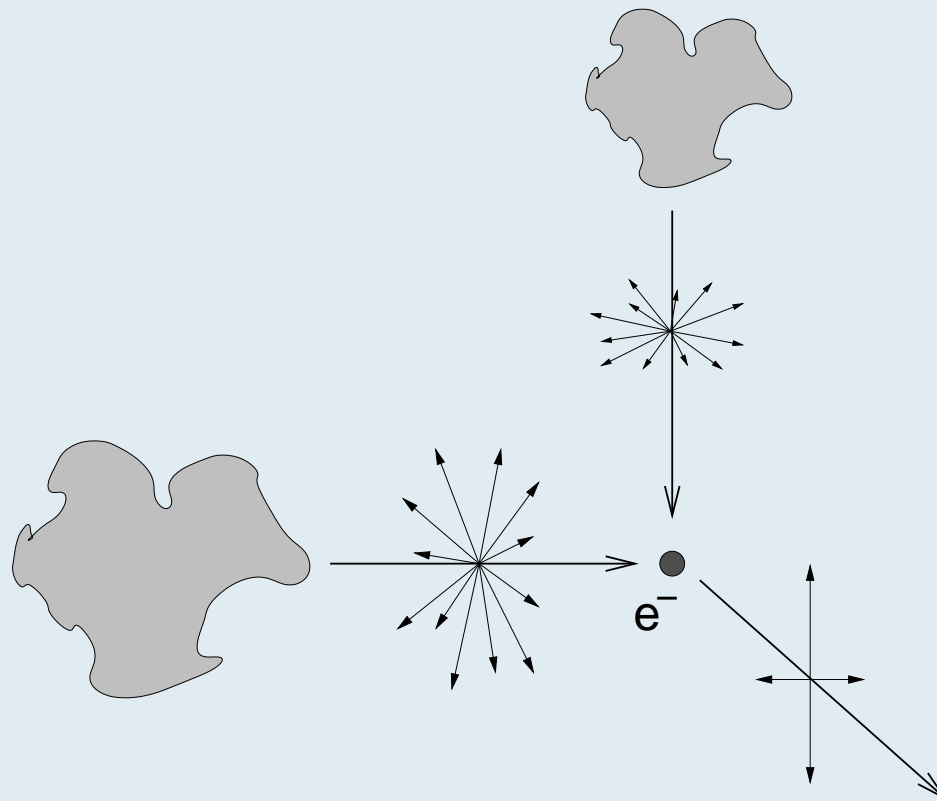
- rekombinace vodíku 380 000 let po velkém třesku (vznik reliktního záření): látka ve vesmíru neionizovaná
 - látka v mezigalaktickém prostředí v současné době: ionizovaná
- ⇒ v minulosti došlo k opětovné ionizaci (*reionizaci*) mezigalaktické látky

Polarizace reliktního záření: e^-

- rekombinace vodíku 380 000 let po velkém třesku (vznik reliktního záření): látka ve vesmíru neionizovaná
 - látka v mezigalaktickém prostředí v současné době: ionizovaná
- ⇒ v minulosti došlo k opětovné ionizaci (*reionizaci*) mezigalaktické látky
- docházelo k rozptylu reliktního záření na volných elektronech pocházejících z období reionizace vesmíru ⇒ polarizace reliktního záření

Polarizace reliktního záření: e^-

- docházelo k rozptylu reliktního záření na volných elektronech pocházejících z období reionizace vesmíru \Rightarrow polarizace reliktního záření

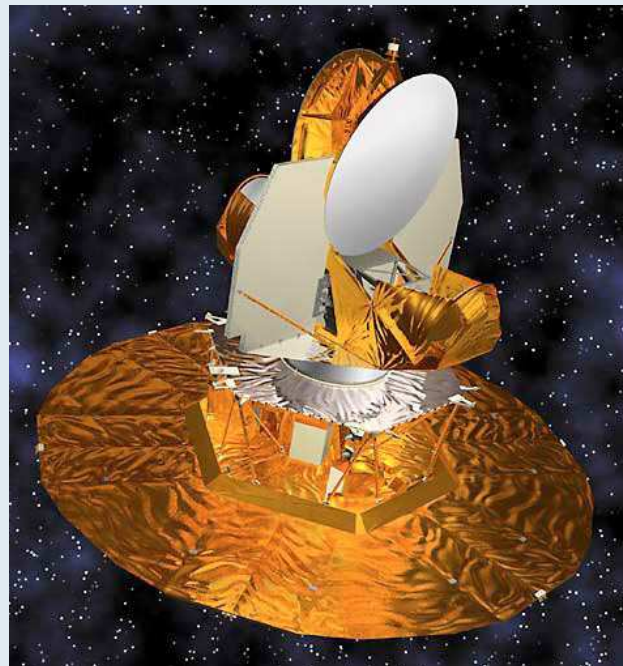


Polarizace reliktního záření: e^-

- docházelo k rozptylu reliktního záření na volných elektronech pocházejících z období reionizace vesmíru \Rightarrow polarizace reliktního záření
- polarizace reliktního záření v sobě skrývá informaci o období reionizace

Polarizace reliktního záření: e^-

- docházelo k rozptylu reliktního záření na volných elektronech pocházejících z období reionizace vesmíru \Rightarrow polarizace reliktního záření
- WMAP: detekce polarizace reliktního záření



Polarizace reliktního záření: e^-

- docházelo k rozptylu reliktního záření na volných elektronech pocházejících z období reionizace vesmíru \Rightarrow polarizace reliktního záření
- PLANCK: omezení na období, kdy docházelo k opětovné ionizaci (zhruba 400 000 let po velkém třesku) + detekce fluktuací polarizace



Odlišení: hustota \times vlny

- rozložení polarizace na tzv. E a B mód
 - E mód: obdoba elektrického pole (potenciálové)
 - B mód: obdoba magnetického pole (vírové)

Odlišení: hustota \times vlny

- rozložení polarizace na tzv. E a B mód
 - E mód: obdoba elektrického pole (potenciálové)
 - B mód: obdoba magnetického pole (vírové)
- akustické hustotní vlny: E mód
- prvotní gravitační vlny: E i B mód

Polarizace reliktního záření: vlny

- gravitační vlny pocházející z inflační fáze vývoje vesmíru také mohly vést k polarizaci reliktního záření (E i B mód polarizace)

Polarizace reliktního záření: vlny

- gravitační vlny pocházející z inflační fáze vývoje vesmíru také mohly vést k polarizaci reliktního záření (E i B mód polarizace)
- experiment BICEP2: detekce gravitačních vln z inflační fáze

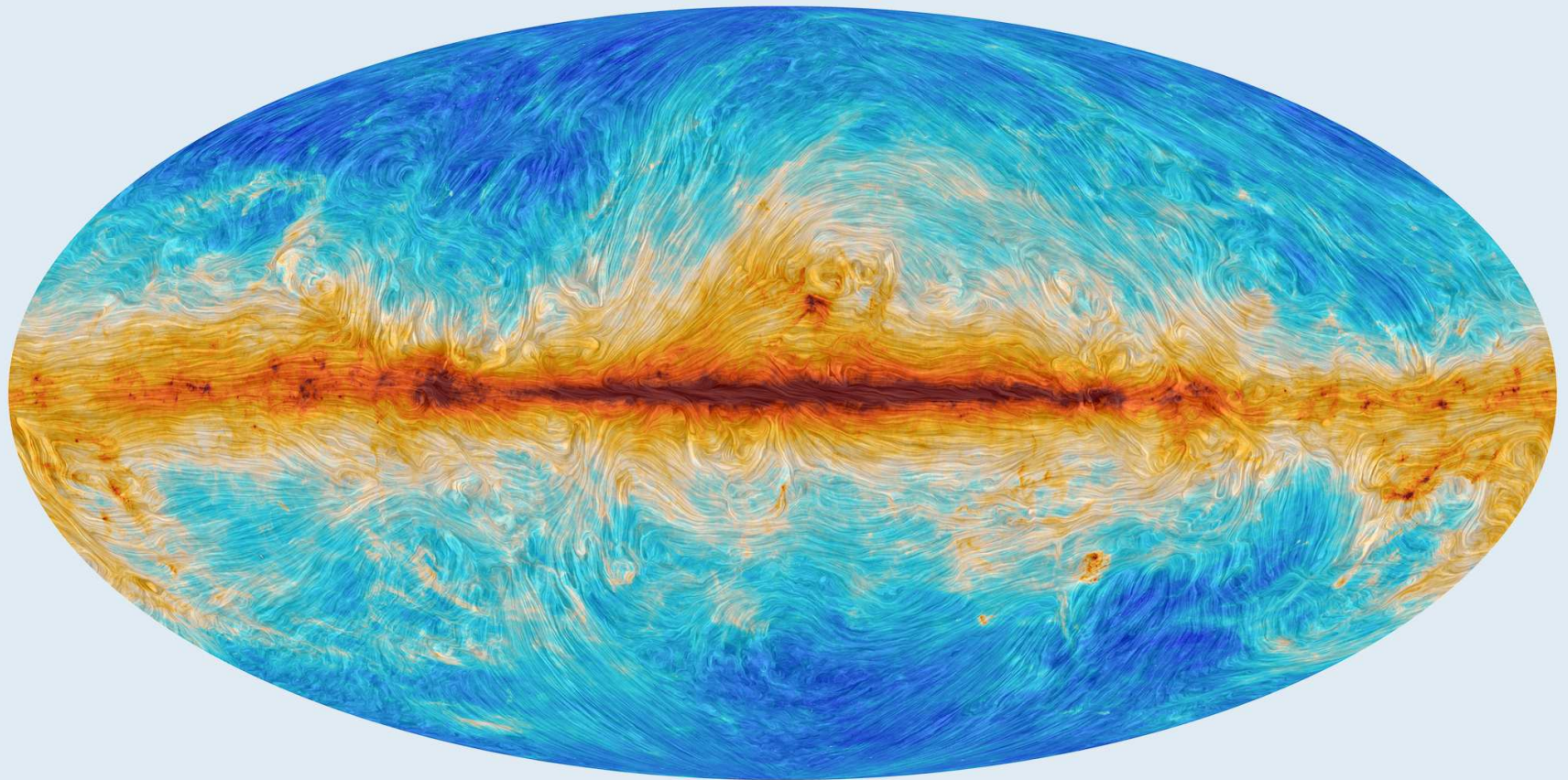


Polarizace reliktního záření: vlny

- gravitační vlny pocházející z inflační fáze vývoje vesmíru také mohly vést k polarizaci reliktního záření (E i B mód polarizace)
- experiment BICEP2: detekce gravitačních vln z inflační fáze
- další zdroj polarizace: rozptyl na prachových částicích v Galaxii

Polarizace reliktního záření: vlny

- gravitační vlny pocházející z inflační fáze vývoje vesmíru také mohly vést k polarizaci reliktního záření (E i B mód polarizace)



Polarizace reliktního záření: vlny

- gravitační vlny pocházející z inflační fáze vývoje vesmíru také mohly vést k polarizaci reliktního záření (E i B mód polarizace)
- experiment BICEP2: detekce gravitačních vln z inflační fáze
- další zdroj polarizace: rozptyl na prachových částicích v Galaxii
- PLANCK: podrobné odečtení vlivu prachových částic \Rightarrow B mód polarizace pochází pouze od prachových částic, žádný signál od prvotních gravitačních vln

Závěr

- reliktní záření důležitým zdrojem informací o vesmíru
- fluktuace teploty reliktního záření: určování kosmologických parametrů
- polarizace reliktního záření nese významnou část informace
- zdroj polarizace: volné elektrony a prach, prvotní gravitační vlny detekovány nebyly

Závěr

- reliktní záření důležitým zdrojem informací o vesmíru
- fluktuace teploty reliktního záření: určování kosmologických parametrů
- polarizace reliktního záření nese významnou část informace
- zdroj polarizace: volné elektrony a prach, prvotní gravitační vlny detekovány nebyly
- je možné očekávat další objevy