

# L'experiment BICEP2 i la detecció d'ones gravitatòries

Miquel Nofrarias ([nofrarias@ice.cat](mailto:nofrarias@ice.cat))  
Institut de Ciències de l'Espai (IEEC-CSIC)

---

*El 17 de març de 2014 l'equip d'investigadors del telescopi BICEP2 (de les sigles Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarisation) van donar a conèixer en una roda de premsa al Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics la detecció de l'empremta causada per les ones gravitatòries en la polarització del fons d'ones còsmic de microones. Tot i que encara se n'espera una confirmació independent per part d'algun altre experiment, l'anunci ha provocat un gran impacte en la comunitat científica per la importància i les implicacions del descobriment. La notícia ha estat també d'un gran impacte mediàtic ja que aquest descobriment ens aporta informació directa dels primers instants del nostre Univers.*

---

**Paraules clau:** Ones gravitatòries, telescopi BICEP2, fons còsmic de microones

---

*On 17 March 2014, researchers from the telescope BICEP2 (acronym of "Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization") announced the detection of the footprint of gravitational waves in the polarization of the cosmic microwave background. It was announced in a press conference at the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Although the detection is yet to be confirmed independently by other research groups, the announcement has caused a great impact on the scientific community due to the importance and the implications of the discovery. It has also brought a huge media impact since the discovery gives us direct information of the first moments of our universe.*

---

**Key words:** Gravitational waves, BICEP2 telescope, cosmic microwave background

---

## LES ONES GRAVITATÒRIES

L'existència d'ones gravitatòries va ser predita per Albert Einstein el 1915 dintre del marc de la seva Teoria de la Relativitat General. En aquesta teoria, Einstein proposava deixar de considerar l'espai i el temps com entitats absolutes e inalterables i suggeria que calia entendre'ls com elements dinàmics que podien ser pertorbats per la presència de massa o energia. En aquest sentit, la presència d'una certa quantitat de massa o energia tindria un efecte en la nostra mesura de l'espai i el temps. Més enllà de ser una proposta original, aquestes idees van permetre a Einstein fer prediccions que posteriorment es van demostrar encertades. Possiblement la més celebrada va ser la desviació de la llum provinent dels estels en passar al voltant del Sol, que una expedició a

l'Àfrica va mesurar el 1919 durant una eclipse total de Sol.

Més enllà d'esdeveniments astronòmics, avui en dia utilitzem les prediccions de la Relativitat General d'una forma molt més quotidiana, tot i que sovint no en siguem conscients. Per exemple, els nostres aparells GPS tenen en compte correccions relativistes per donar-nos la localització precisa on ens trobem. Això es deu a que per localitzar-nos aquests aparells necessiten comparar els rellotges de l'aparell receptor amb el de l'emissor, el qual es troba en un satèl·lit en òrbita. La teoria d'Einstein prediu que el temps mesurat pels rellotges que es troben en òrbita avança més ràpid que els que es troben en la superfície terrestre, degut a que el camp gravitatori de la Terra és més intens en els darrers. Per al cas del GPS això implica una

diferència de 0,045 segons entre els rellotges en òrbita i els terrestres per cada dia que passa.

Les ones gravitatòries van ser igualment una altra de les prediccions de la Teoria General de la Relativitat. Si en aquesta teoria la gravetat esdevé una conseqüència de la distribució de massa i energia, qualsevol canvi en aquesta distribució es tradueix en una pertorbació en la gravetat que es propaga en l'espai. Podem fer una analogia amb el cas electromagnètic, que potser ens sigui més proper: les ones electromagnètiques s'originen accelerant càrregues elèctriques. En aquest procés, les càrregues alliberen energia en forma de radiació electromagnètica que pot anar des d'ones de ràdio fins a raigs X, depenent de l'energia que s'allibera en aquesta acceleració. De la mateixa manera, en la Relativitat General, les masses en moviment generen ones gravitatòries, però una de les diferències més rellevants entre els dos casos és que la interacció gravitatòria és molt més feble i per tant es necessiten grans quantitats de massa per assolir un efecte apreciable. De fet, els principals objectes dels que s'espera poder mesurar una ona gravitatòria són esdeveniments molt violents en el nostre Univers, com per exemple la col·lisió de forats negres (cadascun dels quals tindria una massa equivalent a milions de vegades la del nostre Sol).

## QUÈ HA DETECTAT L'EXPERIMENT BICEP2?

Entre aquests esdeveniments on intervé una gran quantitat d'energia i que per tant són susceptibles de produir ones gravitatòries cal considerar-hi també els primers moments del nostre Univers. En efecte, a la dècada dels 80 Alan Guth proposà que, en els primers instants d'existència, el nostre Univers va experimentar un procés, al que va anomenar inflació, segons el qual l'Univers es veuria sotmès a un procés d'expansió extrem durant el qual en una fracció de segon augmentaria la seva mida en un factor enorme. Per tal de donar un cert sentit quantitatiu a aquestes paraules podem posar valors aproximats a aquestes quantitats: Estaríem parlant d'una etapa que duraria de l'ordre de  $10^{-36}$  segons i provocaria que l'Univers augmentés la seva mida de l'ordre d'un factor  $10^{22}$  que, en ordre de magnitud, vindria a ser com si en aquest espai mínim de temps un nucli atòmic assolís tot el volum del Sol.

La inflació es va proposar com una solució a diferents problemes que es plantejaven al intentar entendre les observacions cosmològiques de

l'època. La principal propietat de la inflació és que, en proposar una expansió tant extrema, al mateix temps produïa un efecte de suavitzat o d'allissament de irregularitats en l'Univers primitiu. És a dir, aquelles inhomogeneïtats que poguessin existir en l'estat inicial de l'Univers es veurien diluïdes durant aquesta dràstica expansió donant lloc a un Univers que a gran escala seria fonamentalment homogeni, tal com l'observem avui en dia. La inflació, doncs, es va proposar com un paradigma per a poder entendre l'Univers tal i com el coneixem avui en dia.



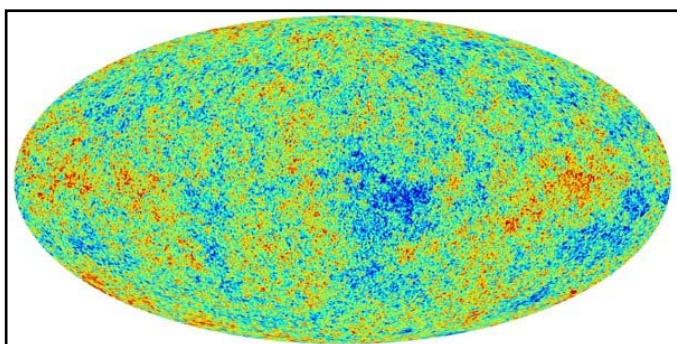
**Figura 1.** En l'imatge el mòdul conegut com a Dark Sector Lab situat al Pol Sud. El telescopi a l'esquerra és el BICEP2 i a la dreta el South Pole Telescope. Credits: Steffen Richter, Harvard University

Però la inflació no només solucionava certes dificultats en la cosmologia sinó que, com a teoria científica, feia prediccions concretes sobre quantitats mesurables. En particular, predeïa que aquesta expansió amplificaria les oscil·lacions degudes a les ones gravitatòries que es produeixen en els primers moments de l'Univers fins a fer-les observables avui en dia. De fet, aquesta predicció és la que l'equip d'investigadors de l'experiment BICEP2 reclamen haver confirmat, tot i que fins que un experiment independent no ho verifiqui és prudent no considerar-ho una detecció definitiva.

BICEP2 és un telescopi situat al Pol Sud, una localització ideal per a les observacions a les que està destinat ja que evita la contaminació lumínica i, sobretot, l'ambient extremadament sec minimitza l'absorció per vapor d'aigua de la radiació que es pretén observar. El telescopi BICEP2 observa el que es coneix com a fons còsmic de microones (en anglès, *cosmic microwave background*). Aquesta és una radiació que té el seu origen en un moment concret de l'expansió de l'Univers quan, com a

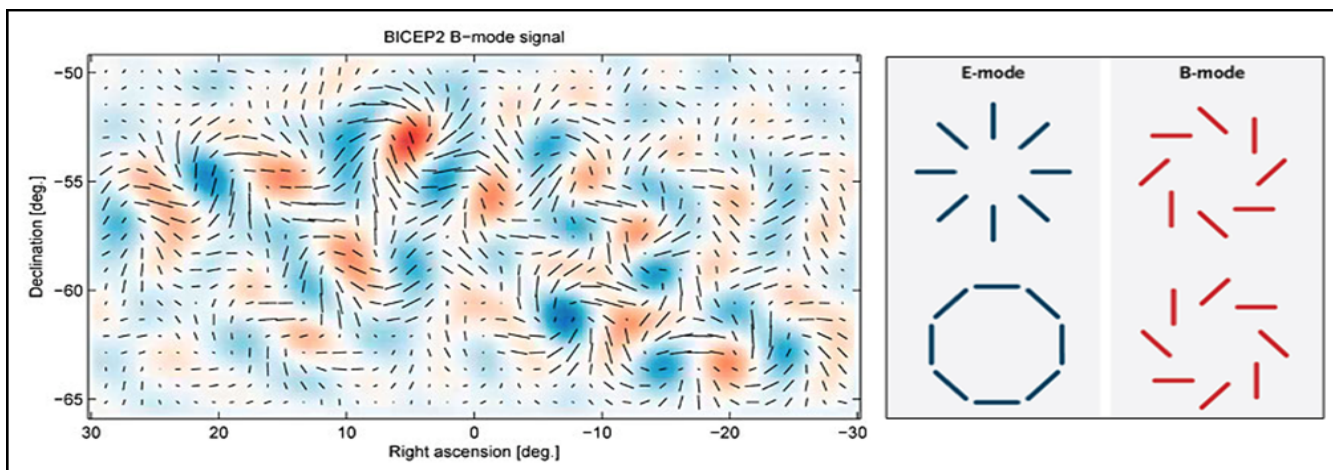
resultat de la seva expansió, l'Univers es refreda fins a una temperatura suficient perquè es puguin formar àtoms d'hidrogen. En aquest moment i com a conseqüència d'aquest fet es produeix aquesta radiació que avui podem observar. És com mirar una fotografia del nostre Univers quan era molt jove, és a dir, quan només tenia 380.000 anys. Per posar-ho en context, es calcula que el nostre Univers té avui 13.8 bilions d'anys des del Big Bang. Per saber-ne més sobre el fons còsmic de microones us podeu adreçar al número 6 de la revista Ciències (Massó i Aliberas, 2007). Quan s'observa amb els instruments adequats el fons còsmic de microones té una aparença com el que apareix a la Figura 2.

En aquest cas, es tracta de l'observació que n'ha fet el satèl·lit Planck de l'Agència Espacial Europea. En la imatge veiem aquesta foto del nostre Univers jove que comentàvem abans. Els punts vermells i blaus que observem són zones més calentes i fredes respectivament d'aquesta radiació. Tot i que a primera vista pugui semblar que no és homogeni tal i com comentàvem, cal tenir en compte que aquests canvis de temperatura corresponen a una part entre 100.000 i per tant cal mesurar amb instruments molt precisos per poder-hi observar aquestes irregularitats. En cas contrari, el que observaríem és la radiació més extraordinàriament homogènia en el nostre Univers, a una temperatura de 2.7K.



**Figura 2.** Mapa del cel mostrant el fons còsmic de microones tal com l'ha observat el satèl·lit Planck de l'Agència Espacial Europea. La imatge mostra la temperatura de la radiació observada, les variacions que s'observen són corresponen a una part entre 100.000. Aquestes mesures certifiquen fins a quin punt el nostre Univers és homogeni quan l'observem a gran escala. Crèdits: ESA

El telescopi BICEP2 observa una petita regió d'aquest fons còsmic de microones. La particularitat d'aquest instrument és que no només mesura la intensitat de les variacions en aquesta radiació sinó que és capaç de mesurar la polarització d'aquesta radiació. Per entendre-ho cal tenir present que tota llum (o radiació electro-magnètica) té una certa polarització, la qual hem d'entendre com l'orientació amb la que oscil·la el camp electromagnètic. Quan nosaltres utilitzem ulleres de sol amb vidres polaritzats vol dir que només permetem que els rajos de llum que oscil·len amb una certa polarització (és a dir, amb una certa orientació) puguin arribar fins als nostres ulls. El telescopi BICEP2 actua de la mateixa manera amb la radiació del fons còsmic mesurant curosament quina és la orientació de la radiació que li arriba.



**Figura 3.** Els resultats de l'experiment BICEP2. Esquerra: mapa del cel amb les observacions del fons còsmic de microones. Les zones blaves i vermelles mostren zones més fredes o calentes respectivament de la radiació. Les línies negres ens mostren la polarització d'aquesta radiació. Dreta: Esquema mostrant esquemàticament els patrons corresponents als modes E i B de polarització. El mode B és el que s'associa amb les ones gravitatòries. Crèdits: BICEP2 Collaboration

El per què d'aquesta mesura ens torna a l'origen de l'article. Les ones gravitatòries provoquen un patró característic en la polarització del fons còsmic de microones, és a dir que fan que la llum oscil·li més en una direcció que en una altra. En particular, provoquen un patró que apareix provocant el que podríem considerar petits remolins en la polarització. És el que es coneix com els modes B de la polarització, en contrast amb el modes E que provoquen formes com asteriscs o cercles, tal com podem veure a la Figura 3. En la mateixa figura a l'esquerra, hi mostrem els resultats de les observacions de la polarització del fons còsmic de microones en la regió del cel observada per BICEP2. Tot i que cal un anàlisis detallat per poder-ne extreure una conclusió científica, hi podem intuir a simple vista els remolins que indiquen el senyal del mode B en la polarització d'aquesta radiació.

Trobar aquest patró en el fons còsmic és una manera de demostrar que estem mesurant l'efecte que les ones gravitatòries originades en la inflació i, per tant, una prova definitiva (sempre i quan altres experiments ho confirmin) de que el nostre Univers va passar per un període extremadament curt i intens d'expansió tal i com proposa la Teoria de la inflació.

## ASTRONOMIA D'ONES GRAVITATÒRIES

Aquest descobriment ha posat de relleu la importància de la radiació gravitatòria com a eina per entendre l'Univers. Però BICEP2 no és l'únic experiment que intenta detectar l'efecte de les ones gravitatòries. De fet, hi ha d'altres experiments específicament dissenyats amb aquesta finalitat i que van més enllà de l'efecte de les ones gravitatòries en el fons còsmic de radiació. Els detectors d'ones gravitatòries dels que parlem a continuació estan pensats per a detectar qualsevol font d'ona gravitatòria, sigui quin sigui el seu origen.

La recerca d'ones gravitatòries és un camp emergent. Avui en dia hi ha en funcionament diferents experiments que intenten detectar l'efecte directe de la radiació gravitatòria. Són el que podríem anomenar antenes gravitatòries, i s'espera que mitjançant les seves observacions en un futur pròxim podrem parlar d'astronomia gravitatòria. És a dir, l'observació de l'Univers no a través de les ones electromagnètiques tal i com entenem l'astronomia des dels seus orígens sinó a través de

les ones gravitatòries, les quals ens han d'aportar una visió revolucionària de l'Univers.



**Figura 4.** A dalt: Joseph Weber, pioner en la detecció d'ones gravitatòries a la dècada dels 60, amb un dels seus detectors d'ones gravitatòries. A baix: un dels dos braços del detector LIGO a Handford (EEUU). Cadascun dels braços de l'interferòmetre mesura 4km. Crèdits: LIGO

La cursa per a detectar ones gravitatòries va començar als anys 60 i el pioner en va ser J.W Weber que va construir els primers detectors. Aquests detectors es tractaven de cilindres massius (com es pot veure a la Figura 4) amb els quals Weber pretenia poder mesurar l'efecte del pas d'una ona gravitatòria per aquest sòlid mesurant-ne la ressonància que l'ona provocaria en el cilindre. Cal entendre que l'efecte que

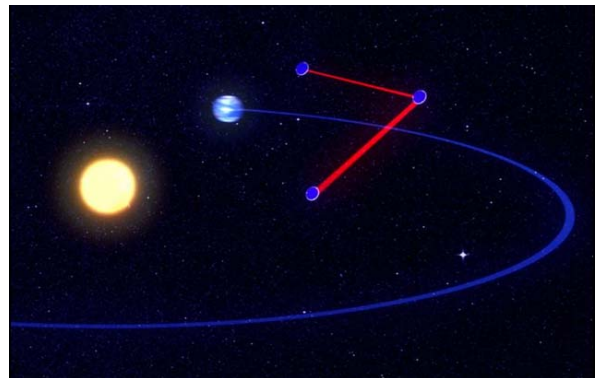
provoca el pas de l'ona gravitatòria en un cilindre (o en qualsevol altre objecte) com el que Weber utilitzava és un efecte de marea, que és tradueix en una expansió i contracció del volum del cilindre. Si aquest efecte es troba al voltant de la freqüència de ressonància del cilindre les oscil·lacions s'amplifiquen i poden arribar a ser detectades mitjançant instrumentació d'alta precisió. Weber (1969) va publicar articles on afirmava haver detectat ones gravitatòries tot i que aquestes van ser refutades posteriorment. Tot i això, el treball de Weber és el responsable d'atreure l'interès de la comunitat científica a el camp de la detecció d'ones gravitatòries.

Els avenços en aquest camp de recerca han seguit des de llavors i avui en dia comptem amb grans experiments funcionant els quals es considera que podrien detectar ones gravitatòries ens els propers anys. Alguns d'ells han perfeccionat l'esquema proposat per Weber com podrien ser el experiments NAUTILUS (Itàlia) o EXPLORER (Suïssa) [1]. Avui en dia, però, l'esquema més utilitzat per a la detecció d'ones gravitatòries és el d'utilitzar interferòmetres de grans dimensions. Entre els més importants dintre aquesta categoria es troben els dos detectors LIGO (EEUU), Virgo (Itàlia) o GEO600 (Alemanya) [2]. Aquests experiments utilitzen interferòmetres que mesuren amb una resolució de fins a  $10^{-22}$ m la distància que separa dos miralls que es troben a cada extrem d'un braç de fins a 4km del interferòmetre (a la Figura 4 un dels braços del detector LIGO a Handford). Com ja hem comentat prèviament, l'efecte de les ones gravitatòries es pot entendre com una variació en la mesura de la distància entre objectes i per tant, una ona gravitatòria que arribi a aquest detector provocarà una variació en la distància entre aquests dos miralls, que l'interferòmetre pot mesurar. Per tal d'assegurar que aquesta variació mínima es deu a una ona gravitatòria i no a qualsevol altre perturbació ambiental, aquests miralls es troben en una càmera de buit (com també s'hi troba el túnel de 4km que recorre el làser) i suspesos amb complexos amortidors que atenuen qualsevol vibració que pogués perturbar la mesura. Aquestes perturbacions típicament tenen el seu origen en l'activitat humana o en moviments sísmics.

Els detectors que actualment es troben en funcionament no han pogut detectar fins al dia d'avui l'efecte de les ones gravitatòries tot i que porten dècades en funcionament. Per aquesta raó es troben actualment en una fase de millora que els

ha de permetre augmentar la seva sensibilitat i permetre una detecció en els propers anys.

Més enllà d'aquests detectors terrestres existeixen també propostes per posar un detector d'ones gravitatòries en òrbita. L'interès per detectar ones gravitatòries des de l'espai és que permetrien observar aquesta radiació a unes longituds d'ona que no són accessibles des de terra. Com ja hem comentat, els detectors terrestres es troben limitats per perturbacions sísmiques que empitjoren la sensibilitat dels detectors a freqüències baixes, típicament per sota de 1Hz. És a dir, en els detectors terrestres es redueix la sensibilitat per a detectar ones gravitatòries que provoquin oscil·lacions amb un període superior a 1 segon. En canvi, l'avantatge de situar un detector d'ones gravitatòries a l'espai és que desapareixen les perturbacions que limiten els detectors terrestres, permetent que el detector faci mesures molt més estables i que per tant sigui capaç de detectar oscil·lacions amb períodes de fins a 10.000 segons. De la mateixa manera que el cel presenta una imatge diferent si l'observem mitjançant llum visible o amb infrarojos (les quals són ones electromagnètiques de diferent freqüència) també per a les ones gravitatòries podem afirmar que el "cel gravitatori" és molt més brillant a freqüències al voltant de 0.0001 Hz (equivalent a 10.000s) i d'aquí l'interès de l'observació d'ones gravitatòries a l'espai.



**Figura 4:** Representació artística de la missió eLISA, un detector d'ones gravitatòries a l'espai que ha estat seleccionat per l'Agència Espacial Europea com a missió per a ser posada en òrbita el 2034. En la imatge tres satèl·lits en òrbita heliocèntrica seguint la Terra i separats 1 milió de quilòmetres cadascun. Mitjançant interferometria làser entre els satèl·lits podem mesurar la variació relativa de les seves distàncies per detectar ones gravitatòries. Crèdits: AEI/MM/exozet



**Figura 5:** LISA Pathfinder en primer pla abans de ser introduït en un simulador d'espai (al fons) on el satèl·lit és sotmès a les mateixes condicions ambientals a les que farà front una vegada en òrbita. Crèdits: Astrium UK

Per aquesta raó el 2013 l'Agència Espacial Europea ha seleccionat el projecte eLISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna) [3] com a missió científica per a ser posada en òrbita el 2034. Aquesta és una missió que en certa mesura reproduïx el sistema de mesura interferomètric que utilitzen els detectors terrestres però traslladant-lo a l'espai. En aquest cas, però, les masses que s'utilitzen com a miralls es troben cadascuna a dins d'un satèl·lit diferent i en caiguda lliure (nominalment), és a dir que un sistema de mesura d'alta precisió permet al satèl·lit seguir el moviment de les masses sense que hi hagi cap contacte entre les masses i el satèl·lit. Cadascun d'aquests satèl·lits es troba separat 1 milió de quilòmetres respecte als altres i seguint una òrbita heliocèntrica al voltant de la Terra, com es representa esquemàticament en la Figura 4. eLISA serà el primer observatori d'ones gravitatòries a l'espai i per aquesta raó se n'espera una nova manera d'observar i d'entendre l'Univers, de la mateixa manera que l'ús dels primers telescopis òptics va permetre a científics com Kepler o Galileo posar en qüestió les teories de l'època mitjançant observacions innovadores.

Les dificultats per assolir els objectius que proposa un projecte com eLISA són molt variats i requereixen grans avenços tecnològics. Per aquesta raó l'Agència Espacial Europea va decidir llançar un satèl·lit previ que posés a prova tots els

elements necessaris per a la detecció d'ones gravitatòries a l'espai. Aquesta és la missió LISA Pathfinder [4] que té previst enlairar-se el 2015 (a la Figura 5 podem veure el satèl·lit abans de ser sotmès a una sèrie de proves tèrmiques). Aquesta missió durà a terme una mesura molt similar a la que es necessita per detectar ones gravitatòries, és a dir, un interferòmetre làser mesurarà la distància entre dues masses que estan en caiguda lliure dins el satèl·lit. La principal diferència és que en comptes de separar les masses 1 milió de quilòmetres es redueix la distància a 50cm de manera que un mateix satèl·lit inclogui les dues masses. La reducció en la distància entre masses fa que LISA Pathfinder no pugui detectar ones gravitatòries, però en canvi permetrà posar a prova tots els elements que ho faran possible en un futur.

Així doncs, en un futur no gaire llunyà les ones gravitatòries seran un element més que tindrem a la nostra disposició per entendre l'Univers i les lleis de la Física que el regeixen. El descobriment del telescopi BICEP2 n'és un exemple però és tan sols un primer pas cap a nova astronomia que emergirà en les properes dècades, l'astronomia gravitatòria. Estigueu atents!

## REFERÈNCIES

WEBER, J. (1969) Evidence for Discovery of Gravitational Radiation *Phys. Rev. Lett.* 22, 1320 (1969).

La revista ofereix accés on-line lliure a aquest article:

<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.22.1320>

MASSÓ, E., ALIBERAS, J. (2007). El fons còsmic de microones i l'origen de l'Univers. *Ciències.* 6 34-39

[1] Es pot consultar a:

<http://www.lnf.infn.it/esperimenti/rog/home.html>

[2] Es pot consultar a:

<http://www.ligo.org>

[3] Es pot consultar a:

<https://www.elisascience.org>

[4] Es pot consultar a:

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/LISA\\_Pathfinder\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/LISA_Pathfinder_overview)