
Euclid

Stefano Dusini, Luca Stanco

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Padova, Padova, Italy

Introduzione

Le origini dell'Universo e la sua evoluzione sono sempre stati uno dei quesiti più affascinanti della scienza e della filosofia. Non c'è cultura antica che non abbia formulato una narrazione sulla nascita dell'Universo o che abbia fatto congetture sulla sua evoluzione. Ma è soltanto nel secolo scorso, con la Teoria della Relatività, che la scienza inizia a porre le prime basi per la costruzione di un modello capace di descrivere la storia del cosmo.

La teoria di Einstein ci dice che la forza di gravità è una conseguenza della geometria dello spazio-tempo, la cui forma dipende dalla materia ed energia presente nello spazio. Ecco che la Teoria della Relatività diventa la base per costruire un modello che descriva l'evoluzione dell'Universo. Infatti passano solo pochi anni dalla pubblicazione delle equazioni di Einstein, che il matematico russo Alexander Friedmann trova una soluzione che descrive l'espansione di un universo omogeneo e isotropo popolato di materia. Friedmann trova che la curvatura dello spazio-tempo dipende da quanta materia è presente nell'universo. Se questa è poca allora l'Universo si espande indefinitamente. Se questa invece è maggiore di una certa quantità critica, il campo gravitazionale prodotto dalla materia è in grado di fermare l'espansione per poi generare una successiva contrazione.

Ma quando Friedmann scrive le sue equazioni non si sa se l'Universo sia in espansione. Non è nemmeno chiaro che esistano altre galassie al di fuori della nostra, per cui guardando alla Via Lattea è naturale pensare che l'Universo

sia statico e quindi l'idea che la Teoria della Relatività predica un Universo o in espansione o in contrazione non piace. In primis ad Einstein, che per risolvere quest'apparente problema introduce nelle equazioni un termine costante tale da annullare il termine cinetico ed ottenere quindi un Universo statico. Così è nata la costante cosmologica.

Ma nel 1929 arriva un'importante scoperta, una di quelle che fanno voltare pagina alla storia della scienza. Edwin Hubble scopre che le galassie non hanno un moto erratico per cui alcune si avvicinano a noi e altre si allontanano. No! tutte le galassie, sufficientemente lontane da non sentire l'attrazione gravitazionale della nostra galassia, si allontanano da noi e la loro velocità è proporzionale alla distanza. In altre parole, l'Universo non è statico ma si sta espandendo e la velocità apparente delle galassie, osservata da Hubble attraverso lo spostamento verso il rosso degli spettri di emissione atomica, non è altro che lo spazio che si dilata.

Questa importante scoperta insieme alle equazioni di Friedmann hanno gettato le basi per la costruzione del modello del Big Bang, secondo cui l'Universo ha avuto origine 13.8 miliardi di anni fa a partire da uno stato iniziale di elevata densità e temperatura per poi espandersi fino all'Universo che oggi conosciamo. Da questo quadro rimaneva aperta la domanda se l'Universo si sarebbe espanso indefinitamente, o se ad un certo punto avrebbe cominciato a contrarsi, sotto l'azione della forza di gravità, per generare quello che in gergo viene chiamato un Big Crunch.

Per trovare una risposta a questa domanda

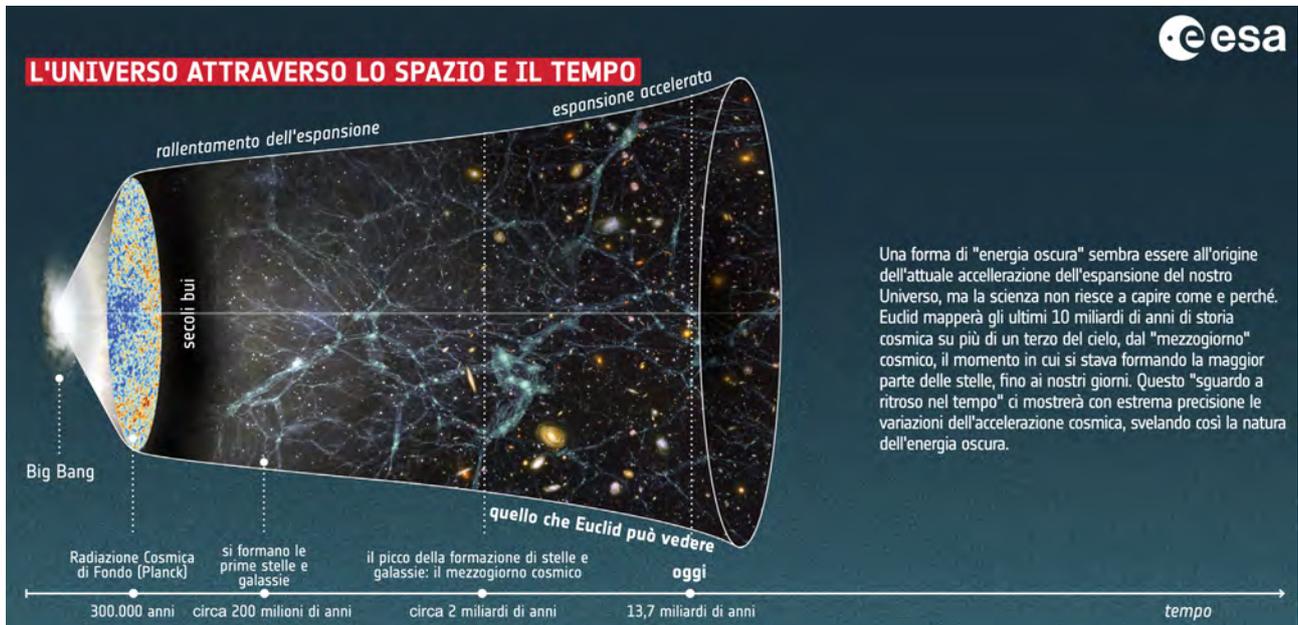


Figura 1: Rappresentazione artistica dell'evoluzione dell'Universo dal Big Bang a oggi. Crediti: Esa/Euclid CC BY-SA 3.0 IGO

gli scienziati dovranno aspettare la fine del '900, quando dalle misure dell'anisotropia della radiazione cosmica di fondo – la radiazione residua del Big Bang – emerge che le fluttuazioni di temperatura osservate sono compatibili con un universo piatto, cioè un universo in cui la densità di energia e materia è pari a quella critica. Ovvero nel nostro Universo non c'è sufficiente energia per frenare l'espansione e generare un collasso (Universo chiuso) ma neanche troppo poca perchè l'espansione non continui all'infinito (Universo aperto). Il nostro è un Universo con una geometria piana che, in assenza di altri effetti, dovrebbe rallentare la sua espansione fino a raggiungere, asintoticamente, uno stato statico.

Come spesso accade nella scienza quando si trova una risposta, questa ne apre altre dieci. Infatti dalla teoria del Big Bang gli scienziati hanno calcolato le abbondanze relative degli elementi leggeri presenti nell'Universo e le hanno confrontate con le osservazioni astronomiche per stimare la quantità totale di materia barionica presente nell'Universo. Il calcolo mostra però che la densità di materia visibile è di molto inferiore alla densità critica. Deve quindi esistere una grande quantità di materia non visibile, chiamata appunto materia oscura, per far sì che la densità totale sia prossima a quella critica.

Per gli astronomi il concetto di materia oscura non era del tutto nuovo. Le osservazioni sulla

velocità di rotazione delle galassie a spirale, già dal lontano 1933 [1] e successive altre lungo un arco di decenni, fino alle prossime osservazioni del Vera Rubin Observatory [2], unite alle osservazioni delle lenti gravitazionali [3] hanno già evidenziato l'esistenza di una materia non visibile.

Ma la sorpresa più grande arriverà nel 1998 quando due gruppi di astronomi e fisici, capitanati da Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess [4], pubblicano i risultati di una ricerca sulle supernove (SN) di tipo Ia (Premio Nobel per la Fisica 2011). Le SN Ia sono delle sorgenti luminose molto intense la cui luminosità è pressoché costante e indipendente dalla particolare esplosione che le ha generate. Questo le rende delle *candele standard* per le quali è possibile misurarne la distanza direttamente dalla loro luminosità apparente. Gli scienziati vogliono confrontare questa distanza, chiamata distanza luminosa, con lo spostamento verso il rosso (redshift) dello spettro di emissione delle SN. Infatti il redshift z , definito come lo spostamento relativo della lunghezza d'onda della luce emessa λ_e ed osservata λ_o di una sorgente lontana

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}, \quad (1)$$

è direttamente proporzionale all'espansione relativa dell'Universo tra l'istante di emissione e di

rivelazione della luce. A seconda di come è avvenuta questa espansione, se a velocità costante o in maniera (de)accelerata, cambia la distanza percorsa dal raggio luminoso e quindi la luminosità apparente della sorgente che lo ha emesso. I ricercatori vogliono cercare una indicazione di un rallentamento nell'espansione dell'Universo compatibile con un universo, chiuso, piatto o aperto. Contro ogni attesa, i risultati non mostrano un rallentamento ma una espansione in piena accelerazione.

Da dove nasce questa accelerazione, qual è la forza che la genera? Per capirlo dobbiamo ritornare alla famosa costante cosmologica introdotta da Einstein e guardare un po' più nel dettaglio le equazioni di Friedmann.

In cosmologia, l'espansione dell'Universo è descritta dal parametro di scala $a(t)$ della metrica dello spazio-tempo

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (2)$$

che ci dice come la metrica evolve nel tempo. In (2) la distanza spazio-temporale ds è data dalla distanza temporale $c^2 dt^2$, essendo c la velocità della luce nel vuoto, e quella spaziale $(dx^2 + dy^2 + dz^2)$ opportunamente scalata dal parametro $a(t)$. Le equazioni di Friedmann ci dicono come la densità di energia e materia dell'Universo influiscono sull'evoluzione del parametro di scala $a(t)$:

$$H^2 = \frac{1}{a} \frac{da(t)}{dt} = \frac{8\pi G}{3c^2} \epsilon - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\epsilon + 3P) + \frac{\Lambda}{3}, \quad (4)$$

dove H è il parametro di Hubble, ϵ e P la densità totale di energia e materia e la sua pressione, Λ la costante cosmologica e G è la costante di gravitazione universale di Newton, mentre k è il parametro di curvatura e vale 0, +1, -1 nel caso la geometria dello spazio sia, rispettivamente, piana, a curvatura positiva o chiusa, a curvatura negativa o aperta. Dall'Eq. (3) si vede che l'aggiungere la costante cosmologica equivale ad aggiungere una nuova componente di energia che, a seconda del suo valore, può annullare l'attrazione gravitazionale, come era stato voluto da Einstein per avere un Universo statico, o determinare una sua espansione accelerata. Un aspetto

importante dell'energia oscura è che la sua densità è costante e non decresce come la densità di materia o radiazione al crescere del volume dell'Universo. Questo vuol dire che in passato, quando l'Universo era più piccolo di adesso, il suo effetto era trascurabile, ma con l'espansione dell'Universo il suo contributo è cresciuto molto, tant'è che ad oggi l'energia oscura, ovvero la componente associata alla costante cosmologica, rappresenta circa il 69% dell'energia totale dell'Universo, mentre il restante è composto da $\sim 25\%$ di materia oscura e $\sim 4\%$ di materia ordinaria. Una conseguenza importante è che l'energia oscura continuerà ad accelerare l'espansione indefinitamente.

Il modello che abbiamo appena descritto è chiamato Λ CDM (Λ Cold Dark Matter) ed è considerato il modello standard della cosmologia. Nonostante il suo grande successo nel descrivere le osservazioni fino ad ora fatte, rimane un modello efficace incapace di descrivere la natura della materia ed energia oscura. Anche il Modello Standard delle particelle elementari e la Meccanica Quantistica non ci aiutano molto. Sebbene la costante cosmologica possa essere interpretata come una manifestazione dell'energia associata alle fluttuazioni quantistiche del vuoto, il valore che il Modello Standard delle particelle elementari prevede risulta essere molte decine di ordini di grandezza più grande del valore attualmente misurato dalla cosmologia.

Per cercare di rispondere a queste domande sono stati formulati diversi modelli alternativi a Λ CDM che ipotizzano l'esistenza di nuove forze che si manifestano solo a scale cosmologiche o modelli che prevedono delle modifiche della Teoria della Relatività e che sono comunemente chiamate teorie di gravità modificata. Purtroppo la precisione e l'accuratezza dei dati che abbiamo in questo momento a disposizione non ci permettono di discriminare tra questi modelli.

La Missione Euclid

Per far luce su questo lato oscuro dell'Universo nel 2008 l'ESA ha approvato la missione spaziale Euclid [5] con l'obiettivo di misurare con estrema accuratezza l'evoluzione dell'Universo e delle strutture a larga scala per comprendere la

Weak gravitational Lensing

Il *Weak gravitational Lensing* (WL) è l'apparente distorsione della forma delle galassie dovuta alla non omogeneità del campo gravitazionale attraversato dai fotoni nel loro viaggio dalla sorgente a noi. L'effetto è simile a quello che si ha guardando attraverso il fondo di un bicchiere. L'immagine sullo sfondo risulta distorta e dal modo come è distorta possiamo capire la forma del bicchiere. Allo stesso modo guardando la distorsione della forma delle galassie possiamo ricostruire la distribuzione della materia oscura e del potenziale gravitazionale attraversato dai fotoni. Non conoscendo però la forma a priori delle galassie che osserviamo, ma solo la distribuzione statistica della loro forma, il segnale di WL è un segnale statistico che si manifesta come una sistematica distorsione in un campione composto da migliaia di galassie.

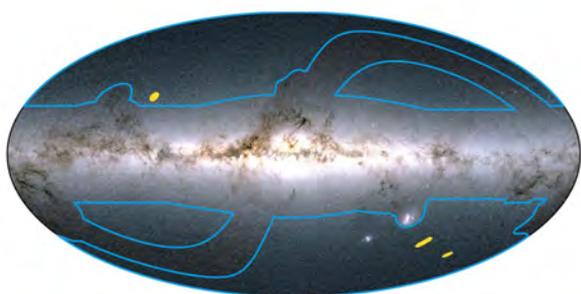


Figura 2: La figura mostra la porzione di cielo che sarà coperta dalla missione spaziale Euclid. Il contorno blu indica la regione coperta dalla "Wide-survey" mentre le due piccole regioni gialle sono due regioni che verranno osservate ripetutamente e più profondamente per stimare la purezza e completezza del catalogo prodotto da Euclid.

natura dell'energia oscura e capire se questa sia dovuta a una nuova forza o a un comportamento differente della gravità su scala cosmica.

L'energia oscura influenza l'evoluzione dell'Universo in due modi: modificando il tasso di espansione dell'Universo e quindi modificando la relazione tra distanza e *redshift*, ma anche modificando la formazione delle strutture su larga scala come gli ammassi di galassie. Infatti l'energia oscura agisce sulla materia come una sorta di anti-gravità, o come preferiscono dire i fisici con una pressione negativa, opponendosi al collasso gravitazionale e quindi riducendo, per esempio, il numero e la dimensione degli ammassi di galassie. Quindi per studiare l'energia oscura dobbiamo ricostruire la storia dell'universo negli ultimi 10 miliardi di anni e capire come, nelle varie fasi della sua evoluzione, materia ed energia oscura abbiano agito per creare gli am-

massi di galassie che oggi vediamo partendo da una distribuzione uniforme di materia, quella dei primi anni di vita dell'universo.

Per raggiungere questo obiettivo la natura ci mette a disposizione alcuni strumenti che sono utilizzati da Euclid per studiare la storia dell'espansione dell'Universo. Il primo va sotto il nome di *Weak gravitational Lensing* (WL) e consiste nel misurare la distorsione osservata della forma delle galassie causata dalla inhomogeneità del campo gravitazionale lungo il cammino dei fotoni dalla galassia al punto di osservazione. Questa distorsione è sensibile sia a come l'Universo si è espanso, $H(t)$, che alla quantità di materia oscura attraversata. Non conoscendo però la forma a priori delle singole galassie e misurandone invece solo la loro distribuzione statistica, il segnale di WL è un segnale statistico che si manifesta come una sistematica distorsione in un campione composto da migliaia di galassie. Il secondo strumento è il *Galaxy Clustering* che consiste nello studio di grandi agglomerati di galassie tenute insieme dal campo gravitazionale prodotto dalla materia oscura contenuta al loro interno. Questi ammassi nascono come evoluzione di piccole fluttuazioni di materia nell'Universo primordiale, che sono cresciute attraverso la forza di gravità prodotta dalla sovra densità, fino a contenere centinaia se non migliaia di galassie. La loro distribuzione nel cielo non è uniforme, ma segue un pattern lasciato dalle oscillazioni acustiche di materia (BAO) presenti nel plasma primordiale (vedi box dedicato).

Misurando queste increspature nella distribuzione degli ammassi di galassie al variare del *redshift*, possiamo ricostruire la storia dell'evolu-

Galaxy Clustering

Il Galaxy Clustering (GC) consiste nello studio di grandi agglomerati di galassie tenute insieme dal campo gravitazionale prodotto dalla materia oscura contenuta al loro interno. Sono tra le più grandi strutture che conosciamo e sono l'evoluzione delle piccole fluttuazioni di materia ed energia presenti nell'Universo primordiale. La loro distribuzione nel cielo non è uniforme, ma segue un *pattern* lasciato dalle oscillazioni acustiche di materia (BAO) presenti nel plasma primordiale.

Nei primi anni di vita l'Universo era un plasma molto caldo in cui la materia era in equilibrio termico con la radiazione. Il plasma era percorso da onde di materia a causa dell'azione opposta della forza di gravità che faceva collassare la materia nelle regioni di sovra densità riscaldando il plasma, e la pressione prodotta dall'interazione dei fotoni con gli elettroni liberi del plasma che invece si opponeva al collasso. Ma quando a causa del raffreddamento del plasma i protoni hanno iniziato a ricombinarsi con gli elettroni per produrre gli atomi di idrogeno, non c'erano più elettroni liberi con cui la radiazione poteva interagire e quindi la pressione di radiazione ha cessato di alimentare le oscillazioni di materia, congelando per sempre queste onde di materia separate da una distanza caratteristica. Questa distanza caratteristica si è evoluta a causa dell'espansione dell'Universo diventando un metro standard da utilizzare per capire di quanto si è espanso l'Universo. Misurando queste increspature nella distribuzione degli ammassi di galassie al variare del *redshift*, possiamo ricostruire la storia dell'evoluzione dell'Universo.

Il GC ci permette inoltre di studiare il tasso di crescita degli ammassi al variare del *redshift*, ovvero dell'epoca evolutiva dell'Universo, e capire il contributo dell'energia oscura nel rallentare la formazione di questi ammassi.

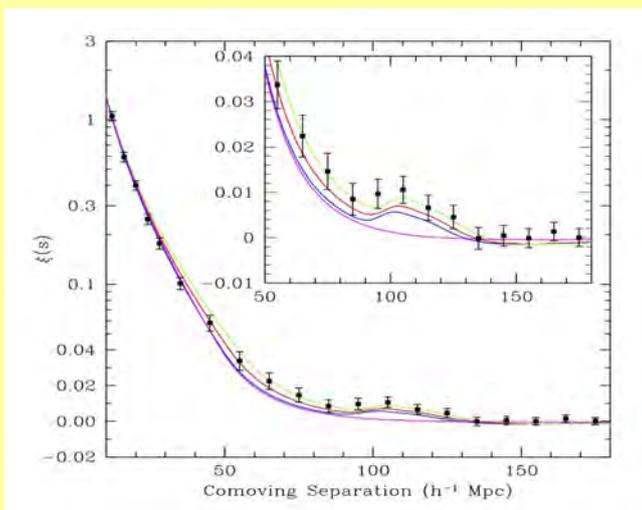


Figura 3: Le funzione di correlazione a due punti delle posizioni dei cluster di galassie nel catalogo SDSS. Il picco a $100 h^{-1} \text{ Mpc}$ è dovuto alle BAO.

zione dell'Universo. Il *Galaxy clustering* ci permette inoltre di studiare il tasso di crescita degli ammassi al variare del *redshift*, ovvero dell'epoca evolutiva dell'Universo, e capire il contributo dell'energia oscura nel rallentare la formazione di questi ammassi.

Per sfruttare a pieno le potenzialità del WL and del GC è fondamentale disporre di un catalogo di galassie il più ampio possibile in termini di

copertura del cielo e profondità di esposizione. Per questo motivo la missione spaziale Euclid fotograferà ~ 15000 gradi-quadrati di cielo extragalattico sul totale dei ~ 45000 di tutto l'Universo (si veda Fig. 2) per costruire il più grande catalogo di galassie fino ad ora realizzato.

Il catalogo conterrà la posizione angolare di miliardi di galassie osservate sia nella banda del visibile che in quella del vicino infrarosso. Per

circa 1.5 miliardi di queste galassie sarà possibile ricostruirne con grande accuratezza la forma e misurarne il *redshift* fino a $z = 2$ che corrisponde a circa 10 miliardi di anni fa. La misura del *redshift* verrà fatta sia in maniera spettroscopica guardando lo spostamento della riga di emissione H_α dell'idrogeno, sia in maniera fotometrica confrontando la luce emessa dalla galassia con tre filtri a banda larga nel vicino infrarosso.



Figura 4: Il satellite Euclid poco prima di essere integrato nel razzo Falcon9 di SpaceX.

Il satellite Euclid

Per poter raggiungere gli obiettivi scientifici di Euclid, la scelta di un telescopio spaziale è stata quasi obbligatoria. Infatti, la necessità di osservare una grande parte di cielo nell'infrarosso per ricostruire il *redshift* delle galassie, e la necessità di ricostruire in maniera accurata la loro forma per misurarne il WL, non hanno lasciato dubbi; bisognava andare nello spazio. Nello spazio la qualità dell'immagine è limitata solo dalla qualità delle ottiche e del rivelatore che la catturano. Per questo motivo il *design* del telescopio è stato particolarmente curato per raggiungere tre importanti requisiti: un grande campo visivo in modo da poter osservare grandi porzioni di cielo in un'unica esposizione, nessun tipo di aberrazione ottica per non falsare il profilo di luce delle galassie e una bassissima luce diffusa all'interno del telescopio in modo da ottenere immagini molto nitide. Il design adottato dall'ESA è stato quello di un telescopio a tre specchi, secondo la configurazione brevettata da D. G. Korsch [6], con lo specchio primario di 1.2 m di diametro. Il campo visivo è di 0.57 gradi quadrati, 180 vol-

te quello dell'Hubble Space Telescope, ma con una qualità dell'immagine paragonabile se non migliore.

La struttura meccanica del telescopio è realizzata interamente in carburo di silicio (SiC). Il SiC è un materiale ceramico molto innovativo che si presta ad applicazioni spaziali. Ha una densità e una conducibilità termica paragonabile a quella dell'alluminio ma è 6 volte più rigido. Inoltre alla temperatura operativa del telescopio Euclid, circa 150 K, il suo coefficiente di dilatazione termica è di soli $0.2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ a tutto vantaggio della stabilità termica delle ottiche. Le superfici del carburo di silicio possono essere lucidate fino ad ottenere specchi con ottime prestazioni ottiche, in questo modo la struttura meccanica del telescopio e le ottiche hanno le medesime proprietà meccaniche riducendo gli stress meccanici a tutto vantaggio della qualità delle immagini. Al di sotto dello specchio primario si trovano i due strumenti: una camera sensibile alla luce visibile (VIS [7]) e uno spettro-fotometro nel vicino infrarosso (NISP [8]) (si veda la Figura 5).

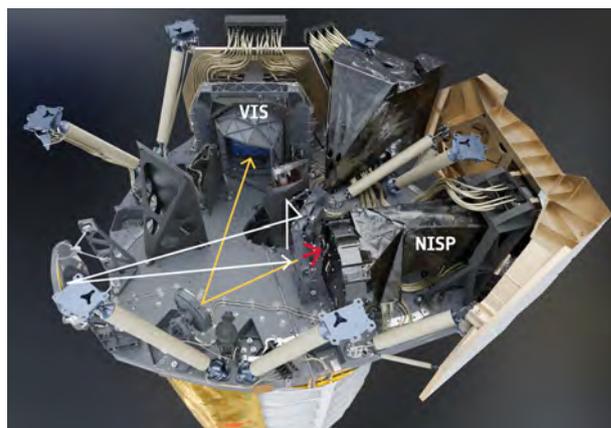


Figura 5: La figura mostra il piano ottico dove sono montati gli strumenti VIS e NISP e il percorso fatto dalla luce proveniente dal telescopio. Questa entra nella cavità attraverso un foro al centro dello specchio primario e viene deflessa per mezzo di una rete di specchi fino ad un filtro dicroico che separa la componente visibile, riflessa verso VIS, dalla componente infrarossa trasmessa a NISP. (Credit: Airbus Defense and Space/ESA)

La luce del telescopio arriva ai due strumenti per mezzo di un filtro dicroico che separa la componente visibile da quella infrarossa. In questo modo entrambi gli strumenti vedono il mede-

simo campo di vista ed è possibile acquisire le immagini in parallelo (Fig 6). Il campo di vista comune dei due strumenti ha un'ampiezza angolare di 0.53 gradi-quadri. Lo specchio secondario

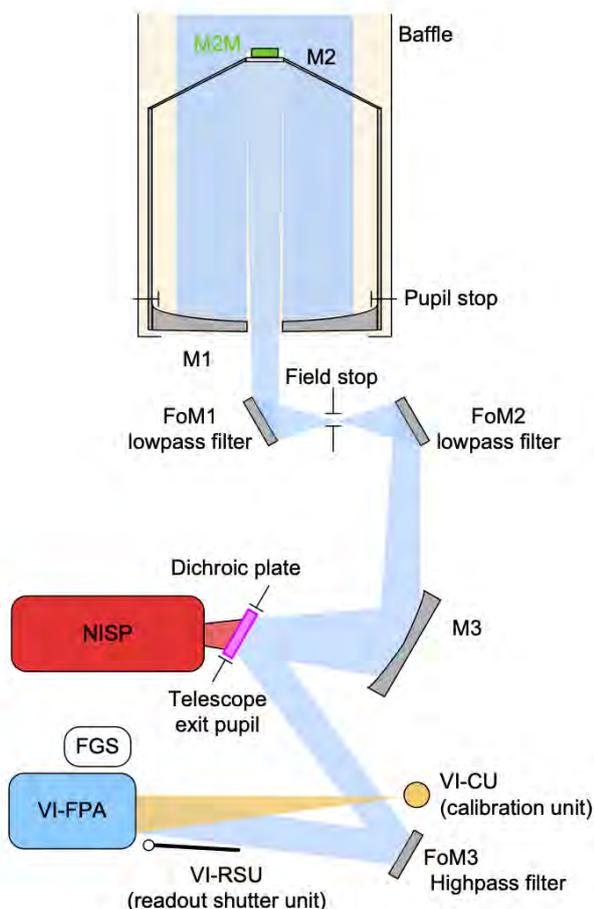


Figura 6: Rappresentazione schematica del telescopio di Euclid.

dario M2 è montato su un meccanismo comandabile da terra (M2M) che permette di muovere lo specchio su tre gradi di libertà ed eseguire la messa a fuoco del telescopio una volta raggiunta la stabilità termica del sistema dopo il lancio. Lo strumento VIS (VISible Instrument) è una camera sensibile alla luce visibile tra 550 nm e 900 nm, disegnata per ricostruire con estrema accuratezza e precisione la forma delle galassie e quindi la distorsione indotta dalle lenti gravitazionali presenti lungo il cammino di luce. La camera è composta da 36 rivelatori CCD, ognuno dei quali composto da 4096x4096 pixel. La dimensione di ogni pixel è di $12 \mu\text{m}^2$ che si traduce in una risoluzione angolare nel cielo di 0.1 arco-secondi, sufficiente per risolvere bene galassie dell'ordine di 0.3 arco-secondi. Con i suoi 604 milioni di pixel VIS è il secondo più grande piano focale

su un satellite spaziale, dopo quello del satellite Gaia dell'ESA. Ma a differenza di Gaia il segnale di tutti i pixel di VIS è trasmesso a terra. I rivelatori sono operati ad una temperatura di circa 150 K per massimizzare l'efficienza di trasferimento della carica raccolta dai CCD, ma l'elettronica di lettura dei CCD e le unità di alimentazione, che sono posti dietro il piano focale, devono lavorare ad una temperatura molto più alta, 280 K. Questa differenza di temperatura è ottenuta in maniera passiva accoppiando termicamente la struttura di supporto dei CCD a quella del telescopio, mentre l'elettronica calda dissipa il calore prodotto nello spazio per mezzo di un radiatore dedicato. Lo strumento VIS è inoltre dotato di un otturatore meccanico per oscurare il piano focale e da una unità di calibrazione che permette di illuminare in maniera uniforme i CCD per determinare la loro risposta alle varie lunghezze d'onda.

NISP è uno strumento abbastanza complesso perché può operare in due modalità differenti: come fotometro per l'acquisizione delle immagini con tre filtri a banda larga (Y_E , J_E e H_E), o come spettrometro per misurare lo spettro della luce dispersa da 4 differenti GRISM. I filtri e i GRISM sono montati su due ruote porta filtri in modo da posizionare alternativamente un filtro o un grism lungo il cammino ottico. Per poter

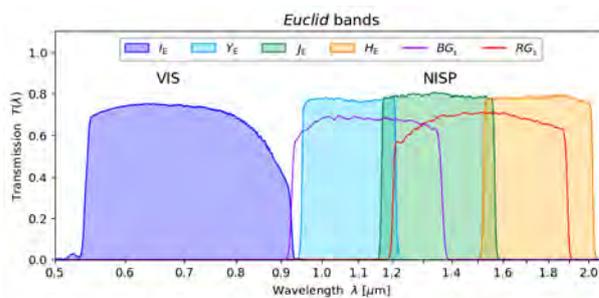


Figura 7: Sensibilità spettrale totale dello strumento VIS e NISP. Le quattro aree colorate si riferiscono a VIS e i tre filtri Y_E , J_E , H_E , mentre le due curve si riferiscono al grism "Blu" e "Rosso".

misurare più spettri nel medesimo campo di vista, le immagini spettroscopiche sono acquisite senza alcuna fenditura.

Ne consegue che tutte le sorgenti nel campo visivo sono disperse consentendo di poterle acquisire contemporaneamente. In regioni di cielo con un'alta densità di galassie può succedere che

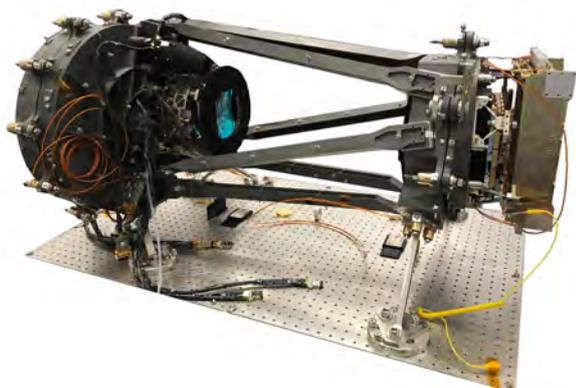


Figura 8: Lo strumento NISP durante la sua fase di test. Sulla sinistra è visibile l'involucro che contiene le due ruote porta filtri e grism, e il sistema di lenti per focalizzare l'immagine su piano focale, posto sulla destra dell'immagine.

gli spettri di queste si sovrappongano generando confusione nella ricostruzione delle linee spettrali. Per questo NISP acquisisce il medesimo campo di vista con 4 differenti direzioni di dispersione che una volta combinanti riducono notevolmente la probabilità di confondere le linee spettrali.

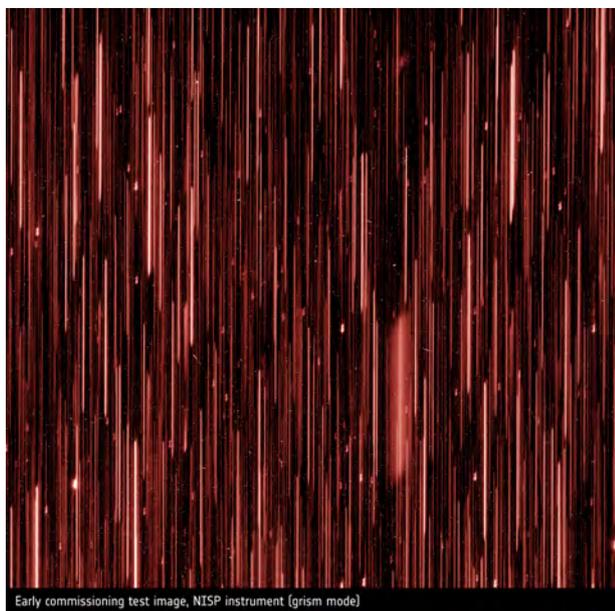


Figura 9: Una delle prime immagini acquisite dallo strumento NISP in modalità spettroscopica dove ogni "riga" di luce è lo spettro di emissione di una stella o di galassia. L'ordine zero dello spettro coincide con la posizione della galassia nelle immagini fotometriche. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, CC BY-SA 3.0 IGO



Figura 10: Una delle prime immagini acquisite dallo strumento NISP in modalità fotometrica nell'infrarosso in banda Y. Nell'immagine è visibile anche la traccia lasciata da un raggio cosmico. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, CC BY-SA 3.0 IGO

Il piano focale di NISP è composto da una matrice 4x4 di rivelatori a pixel CMOS HR2G sensibili alla luce infrarossa fino ad una lunghezza d'onda di 2000 nm. Ogni rivelatore è composto da 2048x2048 pixel con un passo di 18 μm per una dimensione totale del piano focale di circa 15 cm di lato. I rivelatori sono operati ad una temperatura di $\sim 96\text{ K}$ per ridurre il rumore di lettura. Il raffreddamento dei rivelatori è ottenuto con un radiatore passivo che scambia calore con lo spazio. Siccome il piano focale di NISP è più piccolo di quello di VIS, un sistema di lenti poste all'ingresso dello strumento NISP ne adatta la focale.

L'elevato numero di pixel e quindi l'elevata mole di dati prodotti giornalmente dai due strumenti hanno posto una sfida importante nella gestione e trasmissione dei dati a terra. Le immagini acquisite da VIS e NISP sono processate e parzialmente ridotte direttamente a bordo da due unità di processamento dei dati realizzate da OHB-Italia. La trasmissione a terra è fatta quotidianamente attraverso un link in banda-K in grado di trasmettere i 100 Gbyte di dati prodotti giornalmente in circa 4 ore di tempo.



Figura 11: Le prime cinque immagini a colori di Euclid: la galassia a spirale Ic 342 (in alto a sinistra), la Nebulosa Testa di Cavallo (in alto al centro), l'ammasso globulare Ngc 6397 (in alto a sinistra), la galassia irregolare Ngc 6822 (in basso a sinistra) e l'ammasso di galassie del Perseo (in basso a destra). Crediti: Esa/Euclid/Euclid Consortium/Nasa, image processing by J.-C. Cuillandre (Cea Paris-Saclay), G. Anselmi; CC BY-SA 3.0 IGO

Un'altra sfida che ha messo a dura prova gli ingegneri è stato lo sviluppo di un sistema di puntamento del satellite in grado di garantire l'elevata qualità delle immagini richieste per la misura di WL. Euclid è dotato di un sofisticato sistema di controllo d'assetto in grado di mantenere una precisione di puntamento migliore di 75 milli-arco-secondo su un arco di tempo di 700 sec. Questa accuratezza è stata ottenuta realizzando il sistema di guida fine (FGS) direttamente sul piano focale del telescopio. In questo modo il sistema può tracciare le stelle con la medesima risoluzione delle immagini di VIS.

Il lancio e le prime fasi operative

Il satellite Euclid è stato lanciato l'1/7/2023 dalla base di Cape Canaveral, a bordo di un Falcon9 di SpaceX. E poche ore dopo la separazione la navicella è stata messa sulla traiettoria verso la sua destinazione: il punto lagrangiano secondo (L2) del sistema terra-sole a 1.5 milioni di chilometri dalla Terra. Lì orbiterà per 6 anni per mappare i 15000 gradi quadrati di cielo previsti dalla missio-

ne. Durante il suo viaggio verso L2, durato circa 30 giorni, sono stati attivati tutti i componenti del satellite e monitorato il raffreddamento del telescopio. Una volta raggiunta la temperatura operativa si sono accesi gli strumenti VIS e NISP in modo da poter acquisire le immagini e mettere a fuoco il telescopio. A fine luglio, dopo quasi 10 anni di lavoro per la costruzione del satellite e dei suoi strumenti, Euclid mandava a terra le prime immagini. E lo stupore di tutti è stato grande. Le immagini mostravano una nitidezza e una risoluzione veramente impressionanti. La moltitudine di galassie che si vedeva in ogni singola immagine lasciava a bocca aperta. Per mostrare alla comunità scientifica e non le prestazioni del telescopio Euclid, sono state prese alcune immagini iconiche riportate in Fig. 11. Ogni immagine è ottenuta da un unico puntamento combinando le immagini nel visibile con quelle nelle tre bande dell'infrarosso per ottenere gli effetti di colore. La cosa che impressiona di più in queste immagini è la possibilità di acquisire grandi porzioni di cielo, mantenendo la risoluzione e la sensibilità per risolvere oggetti o dettagli molto piccoli. L'immagine dell'ammasso

Cosa è un GRISM

Un GRISM è la combinazione di un reticolo di diffrazione con un prisma disposti in modo tale che la luce di una certa lunghezza d'onda vi passi attraverso senza essere deflessa. Il reticolo di diffrazione disperde la luce nelle sue componenti mentre il prisma è costruito in maniera tale da deflettere la luce per riportare i raggi paralleli a quelli incidenti. In questo modo si può usare un unico rivelatore per fare sia *imaging* che spettroscopia senza dover spostare il rivelatore quando si

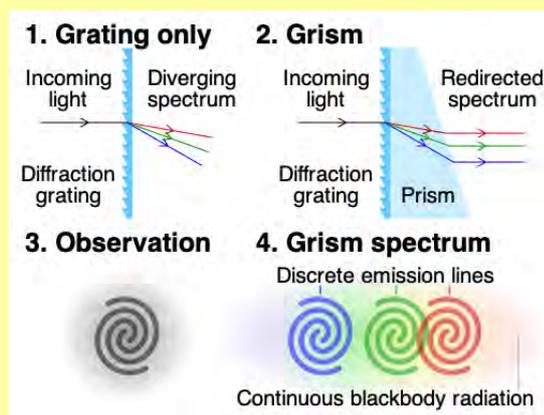


Figura 12: By Cmglee - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://l.infn.it/109>

di galassie del Perseo è particolarmente interessante perché mostra un cluster di galassie a 240 milioni di anni luce da noi, tenute insieme dalla materia oscura presente al suo interno, visibile solo attraverso l'attrazione gravitazionale che esercita sulle galassie dell'ammasso.

Finita la fase di commissioning, ad Agosto è cominciata una fase di calibrazione degli strumenti che sarebbe dovuta terminare a fine settembre. Ma a causa di un problema nel sistema di puntamento fine del satellite, che ha richiesto un aggiornamento del software di bordo, questa fase terminerà a fine novembre. Dopodiché inizierà la vera campagna di mappatura del cielo. I primi risultati della missione Euclid arriveranno nel 2025 con l'analisi dei dati acquisiti nel primo anno di osservazione, ma saranno molto preliminari e ci diranno ancora poco sull'energia e la materia oscura. Per questo dovremo aspettare l'analisi completa dei dati, fra circa 7 anni. Nel frattempo Euclid osserverà con questo dettaglio porzioni di cielo mai osservate prima fornendo una mole incredibile di dati per la comunità astronomica. Possiamo veramente dire che con Euclid si apre una nuova finestra sull'Universo che ci porterà scoperte inimmaginabili.



[1] F. Zwicky: *Astrophysics and Dark Matter Theory*, Helvetica Physica Acta, 6 (1933) 110.

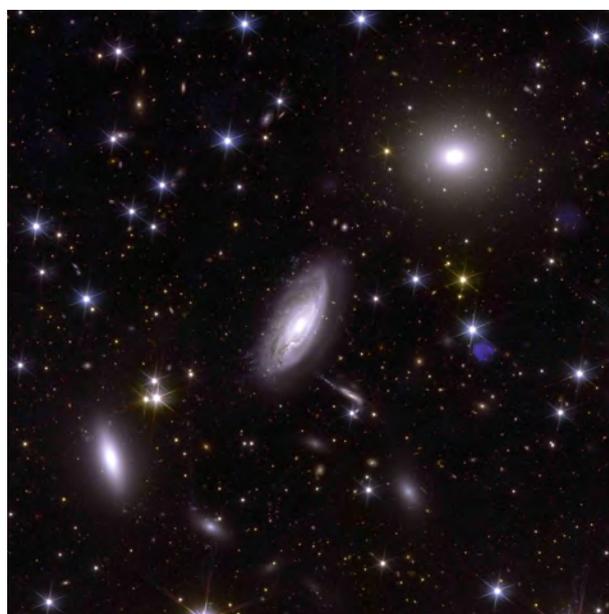


Figura 13: L'ingrandimento di alcune galassie dell'ammasso del Perseo dove si può apprezzare la risoluzione con la quale sono state ricostruite le immagini. Crediti: Esa/Euclid/Euclid Consortium/Nasa, image processing by J.-C. Cuillandre (Cea Paris-Saclay), G. Anselmi; CC BY-SA 3.0 IGO

[2] Vera Rubin Observatory. Il nuovo sito della collaborazione si trova in <https://rubinobservatory.org>

[3] Una buona sintesi si trova in R. Massey, T. Kitching, J. Richard: *The dark matter of gravitational lensing* Rep. Prog. Phys. 73 (2010) 086901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/73/8/086901>

[4] F. Perlmutter et al.: *Discovery of a supernova explosion*

at half the age of the Universe. *Nature*, 391 (1998) 51, (erratum 392, 311) (1998)

A. Riess et al.: *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant* *Astrophysical Journal*, 116 (1998) 1009.

R. Schmidt et al.: *The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae* *Astrophysical Journal*, 507 (1998) 46.

- [5] R. Laureijs et al. *Euclid Definition Study Report* arXiv 1110.3193 (2011) <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.3193>
- [6] R. A. Frosch, D. G. Korsch: NASA, *Anastigmatic three-mirror telescope*, 4101195A, United States Patent Office, USA [1977-07-29] (18 luglio 1978).
- [7] M. Cropper et al. *VIS: the visible imager for Euclid* Proceedings SPIE, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series vol. 10698, p. 10698282018 <https://oro.open.ac.uk/56606/1/56606.pdf>
- [8] T. Maciaszek et al.: *Euclid Near Infrared Spectrometer and Photometer instrument flight model presentation, performance and ground calibration results summary* arXiv 2210.10112 (2022) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10112>



Stefano Dusini: è Primo Ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Padova. È responsabile nazionale dell'INFN della missione spaziale Euclid e è stato responsabile delle attività di integrazione e test dell'elettronica calda dello strumento NISP della missione Euclid.

Luca Stanco: è Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Padova. È stato promotore del coinvolgimento INFN in Euclid, coordinando e perfezionando negli anni le attività delle sedi INFN coinvolte. È stato responsabile nazionale dell'INFN della missione spaziale Euclid fino alla data del lancio.

