Acte solemne d'investidura com a doctor honoris causa del professor

Saul Perlmutter



Discursos de presentació dels professors

Ramon Canal

Pilar Ruiz-Lapuente

Textos en català
Texts in English

MAIG DEL 2019

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Acte solemne d'investidura com a doctor honoris causa
del professor

Saul Perlmutter



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Acte solemne d'investidura com a doctor honoris causa
del professor

Saul Perlmutter

Discursos de presentació dels professors

Ramon Canal

Pilar Ruiz-Lapuente

MAIG DEL 2019

Rector
Joan Elias i Garcia

President del Consell Social
Joan Corominas Guerin

© Edicions de la Universitat de Barcelona
Adolf Florensa, s/n, 08028 Barcelona, tel.: 934 035 430, fax: 934 035 531,
comercial.edicions@ub.edu, www.publicacions.ub.edu



Fotografia de la coberta: Interior del CRAI Biblioteca de Lletres
de la Universitat de Barcelona

ISBN: 978-84-9168-342-1

Sumari

Protocol de l'acte — 9

Discurs de presentació del professor Ramon Canal — 13
Sponsor's speech by Professor Ramon Canal — 19

Discurs de presentació de la professora Pilar Ruiz-Lapuente — 25
Sponsor's speech by Professor Pilar Ruiz-Lapuente — 31

Discurs del professor Saul Perlmutter — 37
Speech by Professor Saul Perlmutter — 49

Protocol de l'acte

Acte solemne d'investidura com a doctor honoris causa del professor Saul Perlmutter

1. S'entra en processó mentre el Cor de la Universitat de Barcelona interpreta el cant d'entrada.
2. El rector, Dr. Joan Elias i Garcia, explica l'objectiu de la sessió acadèmica.
3. El rector dona la paraula a la vicerectora d'Igualtat i Acció Social, Dra. Maite Vilalta Ferrer, la qual llegeix l'acta del nomenament com a doctor honoris causa del professor Saul Perlmutter.
4. El rector invita el degà de la Facultat de Física, Dr. Atilà Herms i Berenguer, i els padrins, Drs. Ramon Canal i Pilar Ruiz-Lapuente, a anar a cercar el doctorand i acompanyar-lo fins al Paranimf.
5. Intervé el Cor de la Universitat de Barcelona.
6. El rector dona la benvinguda al professor Saul Perlmutter, el qual s'asseu al lloc que li ha estat reservat.
7. Els padrins llegeixen els seus discursos, en els quals presenten els mèrits del seu patrocinat.
8. El rector demana als padrins i al degà de la Facultat de Física que acompanyin el doctorand a la presidència.
9. El rector pronuncia les paraules d'investidura:

Pel Consell de Govern de la Universitat de Barcelona, a proposta de la Facultat de Física, heu estat nomenat doctor honoris causa en testimoniatge i reconeixença dels vostres rellevants mèrits.

En virtut de l'autoritat que m'ha estat conferida, us faig lliurament d'aquest títol i —com a símbol— del birret llorejat, antiquíssim i venerat distintiu del magisteri. Porteu-lo com a corona dels vostres mereixements i estudis.

Rebeu l'anell que en l'antiguitat es tenia el costum de lliurar, en aquesta venerada cerimònia, com a emblema del privilegi de signar i segellar els dictàmens, les consultes i les censures escaients a la vostra ciència i professió.

Rebeu també aquests guants blancs, símbol de la puresa, que han de servar les vostres mans, signes de la distinció de la vostra categoria.

Perquè us heu incorporat a aquesta universitat, rebeu ara, en nom del seu Claustre, l'abraçada de fraternitat dels qui s'honoren i es congratulen d'ésser els vostres germans i companys.

10. El rector dona la paraula al nou doctor, Saul Perlmutter, el qual és acompanyat al púlpit pels padrins i el degà de la Facultat de Física.
11. Intervé el Dr. Saul Perlmutter.
12. Els padrins i el degà de la Facultat de Física acompanyen el Dr. Saul Perlmutter al lloc reservat. Se surt en processó mentre el Cor de la Universitat de Barcelona interpreta el cant de sortida.
13. El rector fa el seu discurs.
14. Tots els assistents a l'acte canten l'himne *Gaudeamus igitur*.

GAVDEAMVS IGITVR

Gaudeamus igitur,
iuuenes dum sumus. [bis]
Post iucundam iuuentutem,
post molestam senectutem,
nos habebit humus. [bis]

Vbi sunt qui ante nos
in mundo fuere? [bis]
Adeas ad inferos,
transeas ad superos,
hos si uis uidere. [bis]

Viuat Academia,
uiuant professores. [bis]
Viuat membrum quodlibet,
uiuant membra quaelibet,
semper sint in flore. [bis]

15. El rector aixeca la sessió.

Discurs de presentació del professor Ramon Canal

Rector Magnífic,
autoritats acadèmiques,
professores i professors,
estudiants, amigues i amics,

Vull, primer, agrair a la Facultat de Física i al seu degà, al Departament de Física Quàntica i Astrofísica i al seu director, i a l'Institut de Ciències del Cosmos i al seu director, el suport a aquesta candidatura al llarg de tot el seu camí. També, a la Junta Consultiva de la nostra Universitat, el fet d'haver-la aprovat.

Ja el sol fet de tractar-se d'un Premi Nobel de Física ens indica que la tasca científica del professor Saul Perlmutter ha d'haver estat extraordinària. Però és que el descobriment al qual va lligat el seu nom —el de l'acceleració de l'expansió de l'Univers— ha canviat, com veurem, no pas només la nostra visió de la cosmologia, sinó que afecta igualment la física fonamental, cosa que vol dir, de fet, els fonaments de la física.

El professor Perlmutter va néixer el 22 de setembre de 1959 a Urbana-Champaign (Illinois, EUA). Va obtenir el seu BA (equivalent al nostre grau), amb *magna cum laude*, a la Universitat de Harvard el 1981. Per a la seva tesi doctoral, llegida el 1986, va anar a la Universitat de Califòrnia, a Berkeley (on ara és professor). Amb el títol *An Astrometric Search for a Stellar Companion to the Sun*, la tesi tractava de la possibilitat de detectar l'estel Nèmesi, un hipotètic company del Sol, a una distància per sota d'1 parsec (3,26 anys llum). Aquest estel, en alguns punts de la seva òrbita, podria haver pertorbat fins i tot la part més interior del Sistema Solar i haver provocat extincions massives periòdiques. El treball de Perlmutter, tot i no trobar-lo, no va descartar del tot l'existència de Nèmesi.

Poc després d'haver defensat la seva tesi, Saul Perlmutter es va unir a un petit grup, dins del Lawrence Berkeley Laboratory, que havia començat a fer la cerca automatitzada de supernoves i n'havia trobat de properes amb

aquest mètode. Fruit de la seva experiència buscant Nèmesi, va passar a desenvolupar les anàlisis i les eines informàtiques del grup.

Cal ací descriure molt breument quina era la situació de la cosmologia cap a la fi dels anys vuitanta.

Des del començament de la dècada dels trenta, els treballs d'Edwin Hubble i Milton Humason, a l'Observatori de Mount Wilson, havien establert que les galàxies s'allunyen les unes de les altres a velocitats proporcionals a la distància que hi ha entre elles. Això tenia una interpretació immediata dins la relativitat general d'Einstein: un Univers de densitat uniforme hauria d'expandir-se o de contraure's depenent d'aquesta densitat. L'Univers, doncs, està expandint-se, la qual cosa vol dir que, en el passat, havia estat molt més dens (i també, en conseqüència, més calent). Aquest és el model de la gran explosió o del Big Bang. El model va tenir la seva confirmació amb el descobriment, el 1964, d'una radiació de fons, a les longituds d'ona de les microones, igual en totes direccions, que és el vestigi de l'Univers molt dens i molt calent de només uns 380.000 anys després de l'inici de la seva expansió.

Se sabia com era l'expansió recent de l'Univers, tot i que hi havia fortes discussions sobre el valor de la constant de proporcionalitat entre la velocitat d'allunyament de les galàxies i la distància entre aquestes, la dita *constant de Hubble* (de fet, encara n'hi ha). Però, segons el model relativista de l'expansió, aquesta hauria d'anar-se frenant a causa de l'atracció gravitatòria mútua de les parts de l'Univers. Aquesta frenada seria més o menys ràpida depenent de la densitat mitjana de massa-energia. Si bé la relació velocitat d'allunyament - distància correspon molt aproximadament a una recta fins a distàncies relativament petites, la línia que la representa hauria de començar a corbar-se a distàncies prou grans. Mesurant-ho, sabríem quina és la densitat de massa-energia de l'Univers i quina seria la seva evolució futura.

Quin seria el destí final de l'Univers? Si l'expansió es frenés prou, per l'atracció gravitatòria entre les diferents regions de l'Univers, la seguiria una contracció: les galàxies s'aproparien, en lloc de separar-se, la densitat de l'Univers seria cada cop més gran, com també la seva temperatura, i al final els àtoms es desfarien. Es tornaria al que hi havia al Big Bang i la història podria repetir-se.

Per mesurar, doncs, la frenada de l'expansió de l'Univers, cal anar molt lluny (la qual cosa també vol dir anar molt enrere en el temps). No és

gens fàcil mesurar les distàncies a objectes molt llunyans. La millor manera seria tenir objectes molt lluminosos, de lluminositat fixa i coneguda: *candeles estàndard* prou lluminoses. Els estels individuals són massa febles, amb una gran diferència, per veure'ls a les distàncies que ens interessen. Caldria, doncs, emprar galàxies senceres, fins i tot galàxies gegants amb centenars de bilions d'estels, però ¿sabem prou bé quines són les lluminositats d'aquestes galàxies de manera que ens permetin fer mesures de precisió basant-nos en elles? La resposta és que no.

Hi ha uns objectes transitoris tan lluminosos com les galàxies i dels quals sí que podem saber amb prou precisió la lluminositat: les supernoves d'origen termonuclear (més tècnicament, les supernoves del tipus Ia). Aquestes supernoves són explosions gegantines que es produeixen quan un residu estel·lar molt dens, un nan blanc, xucla part de la massa d'un altre estel molt proper fins a arribar a un valor límit. Llavors comença a contraure's molt de pressa, la qual cosa provoca que el seu material es comprimeixi, s'escalfi i esdevingui una bomba termonuclear de proporcions estellars: una flamarada crema tot l'estel en un parell de segons. Es poden veure ara les que esclataven quan l'Univers era milers de milions d'anys més jove. Com que l'objecte que esclata té sempre la mateixa massa, totes les explosions haurien de ser molt semblants i durant un temps alguns astrònoms deien que aquestes supernoves eren candeles estàndard perfectes. Això no és cert, però tanmateix les supernoves termonuclears es poden emprar com a *candeles calibrades*: les seves lluminositats, un cop arribades als seus màxims, cauen més a poc a poc en les supernoves més lluminoses i més de pressa en les menys lluminoses. Mesurant-ho, es pot saber quina era la lluminositat al punt màxim i deduir la distància amb molta precisió.

El 1990-1991 el grup de Berkeley es va posar ja com a objectiu mesurar la desacceleració de l'expansió de l'Univers emprant supernoves termonuclears molt llunyanes.

Un primer problema per assolir el dit objectiu és que cal tenir temps d'observació en telescopis de diàmetre molt gran. I les supernoves són imprevisibles: poden aparèixer en una galàxia o en una altra sense cap avís previ. Això no és pas gaire problema quan es tracta de supernoves properes, que es poden descobrir «vigilant» sistemàticament un gran nombre de galàxies. Moltes, a més, es troben casualment, mentre s'observa una galàxia per altres raons. Però les llunyanes són molt febles i aquest mètode no

funciona: tot i tenint temps d'observació al telescopi angloaustralià, de 3,9 m, en tres anys no es va veure cap supernova llunyana (val a dir que el 80 % de les vegades feia mal temps, però).

Llavors Saul Perlmutter va idear un nou mètode de descobrir supernoves «per encàrrec»: es tracta d'obtenir una imatge CCD de referència d'un camp donat, just després d'una lluna nova, i una altra, la de «descobriment», just abans de la lluna nova següent. Comparant les dues imatges, apareixen un cert nombre de candidats, dels quals una part són sempre supernoves. Això es veu pels seus espectres. A continuació cal seguir l'evolució de la brillantor de les candidates confirmades (el que se'n diu corba de llum), per tal de deduir-ne la lluminositat. Fins i tot cal observar la galàxia hoste de la supernova quan aquesta ja no es veu, per tal de restar-ne la brillantor per a una mesura prou precisa. D'aquesta manera, es pot programar les observacions amb la certesa que sempre hi haurà supernoves llunyanes per estudiar.

Per aplicar aquest mètode cal combinar observacions fetes amb diferents telescopis, situats en diverses parts del món. Era necessari, doncs, que el Supernova Cosmology Project (SCP) esdevingués una col·laboració internacional, amb la participació d'un cert nombre d'astrònoms i astrònomes de diferents països. En el nostre cas, la professora Pilar Ruiz-Lapuente, de la Universitat de Barcelona, que ja treballava en l'ús de les supernoves per a la determinació de l'escala còsmica de distàncies, va emprar els telescopis de les illes Canàries per a l'estudi fotomètric i espectroscòpic de les supernoves del projecte.

Ja a la fi del 1997, sobre la base de les observacions de trenta-vuit supernoves, l'SCP tenia les primeres evidències de l'acceleració de l'expansió de l'Univers, cosa que es va confirmar totalment després, amb l'anàlisi de quarant-dues supernoves. Un altre grup, el High-Z Supernova Search Team, que també havia començat a estudiar supernoves llunyanes, havia arribat a la mateixa conclusió basant-se en una mostra diferent.

Tot seguit, la professora Ruiz-Lapuente continuarà aquest discurs.

Sponsor's speech
by Professor Ramon Canal

Honourable Rector,
Academic Authorities,
Teaching Staff,
Students and Friends,

I would first like to thank the Faculty of Physics and its dean, the Department of Quantum Physics and Astrophysics and its director, and the Institute of Cosmos Sciences and its director for having supported this candidacy since day one. I am also grateful to the University's Advisory Board for having approved it.

The mere fact that Professor Saul Perlmutter is a physics Nobel Prize winner should be enough to tell us that he has had an extraordinary scientific career. However, the discovery with which his name is synonymous, that the expansion of the universe is accelerating, has not only changed our view of cosmology, but has also had an impact on fundamental physics; in other words, the very foundations of physics.

Professor Perlmutter was born on the 22nd of September 1959 in Urbana–Champaign, in Illinois. He graduated with an AB (equivalent to a Spanish undergraduate degree) from Harvard *magna cum laude* in 1981. He received his PhD in 1986 from the University of California, Berkeley, where he is now a professor. His PhD thesis, which was titled "An Astrometric Search for a Stellar Companion to the Sun", analysed the possibility of detecting Nemesis, a theoretical star thought to be a companion to the sun, less than a parsec (3.26 light years) away. At some points in its orbit, this star could disturb the inner Solar System and cause periodic mass extinctions. Although he didn't manage to find Nemesis, Perlmutter did not completely rule out the star's existence.

Shortly after defending his thesis, he joined a small group at the Lawrence Berkeley National Laboratory that had begun to have some success in carrying out automated searches for supernovae. As a result of his expe-

rience searching for Nemesis, he went on to develop analyses and computer tools for the group.

I am going to briefly describe the state of cosmology towards the end of the 1980s.

Since the beginning of the 1930s, the work of Edwin Hubble and Milton Humason at Mount Wilson Observatory had helped establish that galaxies are moving away from each other at speeds proportional to their distance. This could be directly interpreted within Einstein's general theory of relativity: a universe with uniform density must expand or contract depending on this density. The universe is therefore expanding, which means that in the past it had been much denser and, as a result, hotter. This was the Big Bang model. The model was confirmed by the 1964 discovery of the Cosmic Microwave Background, radiation that is detected in every direction and is left over from a very dense, very hot universe that existed about 380,000 years after it first started to expand.

Scientists knew about the recent expansion of the universe, but continue to be divided about the value of the constant of proportionality between the recessional velocity of galaxies and their distance, known as Hubble's constant. However, according to the relativistic expansion theory, the expansion should be slowing down because of the mutual gravitational attraction of all the matter in the universe. The rate of deceleration would depend on its average mass-energy density. Although the relation between recessional velocity and distance corresponds very roughly to a straight line to relatively small distances, the line that represents it should start curving at far greater distances. Measuring this would tell us the universe's mass-energy density and its future evolution.

What would the ultimate fate of the universe be? If the expansion slowed down enough due to the gravitational attraction between the different regions of the universe, then contraction would follow; the galaxies would come closer together instead of further apart, the density and temperature of the universe would increase, and the atoms would eventually break apart. The universe would return to the way it was at the Big Bang, and then history would repeat itself.

To measure the rate of deceleration of the universe's expansion, it was necessary to study very distant objects (which also meant going very far back in time). But measuring the distance to very distant objects is no

straightforward task. The best method uses very bright objects with a known luminosity, called *standard candles*, with sufficient brightness. Individual stars are too weak and variable to view at the distances that interest us. It would therefore be necessary to use whole galaxies, maybe even giant galaxies with hundreds of trillions of stars. However, do we know the luminosity of these galaxies so that we can make accurate measurements based on them? The answer is no.

But there are transient objects as bright as galaxies, whose brightness we can predict with relative precision: supernovae of thermonuclear origin or, more technically, type Ia supernovae. These supernovae are giant explosions that occur when a very dense stellar remnant, known as a white dwarf, sucks mass from a nearby star until it reaches a critical mass. It then begins to contract very quickly, which causes its material to compress, heat up and turn into a thermonuclear bomb of stellar proportions. A blaze then burns the whole star in a couple of seconds. It is now possible to view supernovae that exploded billions of years ago. Since the objects always have the same mass, all explosions should be similar. For a while, some astronomers even thought that these supernovae were the perfect standard candles. While this is not actually the case, thermonuclear supernovae can be used as calibrated candles; once they have reached their critical mass, bright supernovae fade slowly and faint supernovae fade quickly. Measuring them allows us to find out the maximum brightness and deduce the distance with great accuracy.

In 1990 and 1991, the group at Berkeley Lab set itself the goal of measuring the deceleration of the universe's expansion using very distant thermonuclear supernovae.

One problem that stood in their way was the need for observation time with very large-diameter telescopes. Moreover, supernovae are unpredictable; they may appear in a galaxy without prior warning. This is not an issue when it comes to nearby supernovae, which can be detected while a large number of galaxies are systematically observed. Many are detected accidentally while a galaxy is being observed for other reasons. But the light from distant supernovae is very weak and this method is not effective. Despite the fact that the group had observation time with the four-metre Anglo-Australian Telescope, it took them three years to detect any distant supernovae (although it is worth mentioning that 80 percent of the time they experienced bad weather!).

Saul Perlmutter thus devised a new technique for discovering supernovae "on demand". This involves taking a CCD reference image of a given field, just after a new moon, and then taking a CCD "discovery" image before the next new moon. A comparison of the two images results in a number of candidates, some of which are always supernovae. These are recognised by their spectra. Next, the evolution of the brightness of the confirmed candidates (known as the *light curve*) is observed to deduce their luminosity. It is also important to observe the supernova's host galaxy when the supernova is no longer visible, and then subtract the underlying light to obtain a more accurate measurement. This method allows observations to be scheduled in the certainty that there will always be distant supernovae to study.

To apply this technique, it is necessary to use different telescopes located in different parts of the world. It was therefore inevitable that the Supernova Cosmology Project (SCP) became an international collaboration involving astronomers from different countries. In our case, Professor Pilar Ruiz-Lapuente from the University of Barcelona, who was already using supernovae to determine the cosmic distance ladder, used the Canary Islands telescopes to photometrically and spectroscopically study supernovae for the project.

By the end of 1997, the SCP had uncovered the first evidence of the accelerating expansion of the universe based on the observation of 38 supernovae. This was later confirmed through the analysis of 42 supernovae. Another group, the High-Z Supernova Search Team, who had also begun studying distant supernovae, reached the same conclusion based on a different sample.

Professor Ruiz-Lapuente will now take the floor.

Discurs de presentació de la professora Pilar Ruiz-Lapuente

Rector Magnífic,
autoritats acadèmiques,
professores i professors,
estudiants, amigues i amics,

És per a mi un motiu de gran satisfacció presentar els mèrits del professor Saul Perlmutter per al conferiment del grau de doctor honoris causa de la Universitat de Barcelona. Ell va dirigir la recerca que ha canviat en gran manera la visió que tenim de l'Univers. Després de descobrir l'acceleració de l'expansió de l'Univers, ara mateix continua amb projectes que podran determinar la natura de l'«energia fosca», la causa de l'acceleració. És el propulsor d'una de les missions espacials més importants per a aquesta determinació: el satèl·lit espacial *WFIRST*.

El Supernova Cosmology Project, la col·laboració científica que encapçala Saul Perlmutter, juntament amb una altra col·laboració, el High-Z Supernova Search Team, vam descobrir que l'Univers s'expandeix cada cop més de pressa. Arribarà un moment, doncs, que ja no es formaran nous estels, el gas estarà massa diluït per formar-ne. Les galàxies s'hauran apartat molt i el nostre horitzó es buidarà.

Però és cert que el destí final de l'Univers és el fred i la foscor? És això el que passarà? Depèn de quina sigui la natura de l'energia fosca.

Als anys vuitanta, com ja s'ha esmentat, el grup d'astrònoms de Berkeley va cercar com mesurar la frenada de l'expansió de l'Univers. Saul Perlmutter ens explicarà com es va produir el descobriment que l'expansió, en realitat, s'accelerava.

Vaig conèixer aquest projecte, liderat per Saul Perlmutter, quan jo era a Harvard. Abans havia treballat en un nou mètode per determinar les distàncies a supernoves i mesurar la constant de Hubble, per la qual cosa el projecte em va interessar molt. Feia servir els telescopis de les illes Canàries per mesurar la constant de Hubble i els continuo utilitzant ara, dins del Supernova Cosmology Project, per determinar la natura de l'energia fosca.

L'estiu del 1995 vam organitzar, amb el suport de la nostra Universitat, a Aiguablava, un NATO Advanced Study Institute, un congrés dedicat a les supernoves termonuclears. El Saul i altres membres del grup de Berkeley hi van participar. També hi van ser alguns membres del High-Z Supernova Search Team (que havien començat a fer el mateix). Va ser la primera trobada de les dues col·laboracions. El llibre amb les contribucions al congrés conté el recull més complet del que era l'ús de les supernoves en cosmologia a mitjan anys noranta. En els anys següents, combinant les observacions amb diferents telescopis (el Hubble Space Telescope inclòs), la mostra de supernoves amb distàncies ben determinades es va anar ampliant amb objectes cada cop més distants de nosaltres.

El procés que va dur al descobriment de l'expansió accelerada de l'Univers ha estat, per als que hi vam participar, dins del Supernova Cosmology Project, una experiència extraordinària. Recordo l'emoció i l'entusiasme que va haver-hi en aquelles reunions de treball (a Berkeley, a París, a Barcelona, a Estocolm), on ho vam passar tan bé. El Saul encapçalava i mantenia aquell esperit estimulant. També recordo ara els qui no ho van poder viure l'any 2011, com Gerson Goldhaber, que ens va deixar l'any 2010.

I remember the excitement of the Supernova Cosmology Project meetings, that we greatly enjoyed. Saul led and mantained such joyful spirit.

Finalment, la conclusió era clara: hi havia un component de l'Univers, fins llavors desconegut, que n'accelerava l'expansió, que actuava com una antigravitació. I aquest component era dominant: un 70 % de la densitat total de massa-energia de l'Univers. Les conclusions del High-Z Supernova Search Team, basades en una mostra diferent de supernoves, coincidien amb les nostres. Ho podíem interpretar com una constant cosmològica no nul·la, però aquesta no és l'única possibilitat.

El descobriment de l'expansió accelerada de l'Univers no és pas res de tancat, sinó el començament de l'exploració de l'energia fosca. Nosaltres seguim emprant les supernoves com a eina principal. La posada en funcionament de telescopis de 10 m, com ara el Gran Telescopio de Canarias, ens permet explorar l'Univers molt distant amb una precisió creixent, i aquesta situació encara millorarà molt en el decurs de la propera dècada. La nova generació de telescopis de 30 m i telescopis espacials, com ara el James Webb Space Telescope, donarà una nova dimensió a aquesta recerca.

Com ja he dit, el Saul està impulsant un projecte molt important: la missió espacial WFIRST, equipada amb un telescopi de 2,4 m de diàmetre i amb una instrumentació adequada per observar milers de supernoves fins a distàncies corresponents a un Univers amb una edat de menys del 20 % de l'actual.

La Universitat de Barcelona ha donat suport a aquest treball de la nostra col·laboració. El Supernova Cosmology Project, sota el lideratge del Saul, ha anat creixent i ara som molts més que a l'època del descobriment. Les qualitats humanes del Saul han fet molt per mantenir el grup unit i reforçar-lo. Quan va arribar, el 2011, el Premi Nobel de Física als investigadors principals de les dues col·laboracions, tots els membres del nostre grup inicial hi vam ser convidats i en el seu discurs el Saul es va referir a cadascun de nosaltres mentre es mostraven, a més, imatges de diferents moments del desenvolupament del projecte.

Com calia esperar, quan s'ha acceptat la realitat de l'expansió accelerada de l'Univers, han estat molts els premis i les distincions obtinguts. La llista dels que ha rebut Saul és extraordinàriament llarga i només n'enumeraré els principals:

- Breakthrough of the Year 1998, American Association for the Advancement of Science (*Science Magazine*), al Saul i als dos equips autors del descobriment.
- Fellow de l'American Physical Society (2000).
- Membre de la National Academy of Sciences (2002).
- Fellow de l'American Association for the Advancement of Science (2003).
- Premi Shaw d'Astronomia, compartit amb Adam Riess i Brian Schmidt (2006).
- Premi internacional Antonio Feltrinelli (2006).
- Membre de l'American Academy of Arts and Sciences (2007).
- Premi Gruber de Cosmologia, compartit amb les dues col·laboracions (2007).
- Medalla Einstein, de l'Albert Einstein Society, compartida amb Adam Riess (2011).
- Premi Nobel de Física, compartit amb Adam Riess i Brian Schmidt (2011).

- Membre de l'American Philosophical Society (2014).
- Premi Breakthrough de Física Fonamental 2015, compartit amb les dues col·laboracions.

Amb tots aquests honors i reconeixements, el Saul no ha perdut cap de les seves qualitats humanes ni l'entusiasme per afrontar nous reptes científics. Per això és un col·lega dels més estimats.

With all these honors and awards, Saul has not lost any of his humane qualities, nor the enjoyment in confronting new scientific challenges, which makes him a most estimated colleague.

Darrerament, un dels interessos del Saul és la promoció del pensament crític. Això vol dir l'aplicació dels mètodes de la ciència (raonaments estadístics, tests cecs de dades, etc.) als camps més diversos, incloent-hi les notícies. Els estudiants de ciències els aprenen, però cal estendre-ho a la resta de la societat.

Equipar les futures generacions amb el pensament crític propi de la ciència és una de les defenses més raonables contra el pensament confús i la desinformació. Aquests dos aspectes són reptes de primer ordre perquè les societats democràtiques puguin prendre decisions deliberadament. Aquí hi ha una nova coincidència entre els valors que promou el Saul Perlmutter i els que són el lema de la nostra estimada Universitat de Barcelona.

Per totes les raons esmentades, Rector Magnífic, en reconeixença dels mèrits del professor Saul Perlmutter, demanem avui que l'investiu amb el grau de doctor honoris causa per la Universitat de Barcelona. Estic segura que el professor Perlmutter rebrà, amb gran orgull i honor, aquest títol que tan justament heu decidit atorgar-li, a proposta de la Facultat de Física, de l'Institut de Ciències del Cosmos i del Departament de Física Quàntica i Astrofísica de la nostra Universitat.

Moltes gràcies.

Sponsor's speech
by Professor Pilar Ruiz-Lapuente

Honourable Rector,
Academic Authorities,
Teaching Staff,
Students and Friends,

It gives me great pleasure to present the merits of Professor Saul Perlmutter for the award of an honorary doctorate from the University of Barcelona. Saul Perlmutter directed research that has significantly changed our view of the universe. After discovering the accelerating expansion of the universe, his work now focuses on projects to determine the nature of "dark energy", the cause of the acceleration. He is the main force behind one of the most important space missions to unravel this mystery: NASA's Wide Field Infrared Survey Telescope, or WFIRST.

The Supernova Cosmology Project, the scientific team headed by Saul Perlmutter, along with the High-Z Supernova Search Team, discovered that the universe is expanding at an ever-faster rate. Eventually no new stars will form, because the gas will be too diluted. The galaxies will move away and our horizon will become empty.

But is it true that the ultimate fate of the universe is cold and dark? Is this really what will happen? The answer depends on the nature of dark energy.

As Ramon has already explained, the group of astronomers at Berkeley Lab sought to measure the deceleration of the universe's expansion in the 1980s. Saul Perlmutter will talk about how they discovered that the expansion is, in fact, accelerating.

I first heard about the project led by Saul Perlmutter when I was at Harvard. I had been working on a new method for determining distances to supernovae and measuring Hubble's constant, so the project piqued my interest. At the time, I was using the Canary Islands telescopes to measure Hubble's constant and determine the nature of dark energy. (I still use these same telescopes for the Supernova Cosmology Project.)

In the summer of 1995, we organised the NATO Advanced Study Institute Thermonuclear Supernovae Conference in Aiguablava with the support of the UB. Saul and other members of the Berkeley group took part, and members of the High-Z Supernova Search Team were also present. This marked the first time the two groups had come together. The book of conference contributions contains the most comprehensive information on the use of supernovae in cosmology in the mid-1990s. Over the next few years, we combined observation time with different telescopes (including the Hubble Space Telescope) to increase the sample of supernovae with known distances and to observe increasingly distant objects.

The process that led to the discovery of the accelerating expansion of the universe was an extraordinary experience for the members of the Supernova Cosmology Project. I remember those work meetings in Berkeley, Paris, Barcelona and Stockholm. The enthusiasm and excitement were palpable, and we had so much fun. Saul was the one who had instigated that optimism and helped keep it alive. I would also like to take a moment to mention those who couldn't be with us in 2011, including Gerson Goldhaber, who passed away in 2010.

At last there was a clear conclusion: a previously unknown component of the universe was accelerating the expansion and acting as an anti-gravity force. And this component was dominant; some 70 percent of the total mass of the universe. The High-Z Supernova Search Team had used a different sample of supernovae but their conclusion was consistent with ours. It could be interpreted as a non-zero cosmological constant, but this was not the only possibility.

The discovery of the accelerating expansion of the universe wasn't the end; rather, it marked the beginning of the exploration of dark energy. We continue to use supernovae as our main tool. The commissioning of 10-metre telescopes, such as the Gran Telescopio Canarias, means that we can explore distant parts of the universe with increasing precision, and the situation will improve even more over the course of the next decade. The new generation of 30-metre telescopes and space telescopes, such as the James Webb Space Telescope, will add a new dimension to this search.

As I said, Saul is currently promoting a very important project: the WFIRST space observatory, which is equipped with a telescope 2.4 me-

tres in diameter and instruments capable of observing thousands of supernovae at distances corresponding to a time when the universe was less than 20 percent of its present age.

The University of Barcelona has supported this work carried out by our group. The Supernova Cosmology Project, under the leadership of Saul, has been growing and now has many more members than when the discovery was first made. Saul's human qualities have played a key role in unifying and strengthening the group. When the principal investigators of the two groups were awarded the Nobel Prize in Physics in 2011, all members of our initial group were invited and Saul referred to each and every one of us in his speech, while showing images of the different stages of the project.

As expected, when the reality of the discovery hit, the awards and distinctions started flooding in. The list of Saul's awards and honours is very long, so I will only mention the main ones:

- Breakthrough of the Year 1998, American Association for the Advancement of Science (*Science Magazine*), shared by the members of the Supernova Cosmology Project and the High-Z Supernova Team.
- Fellowship of the American Physical Society (2000).
- Membership of the National Academy of Sciences (2002).
- Fellow of the American Association for the Advancement of Science (2003).
- Shaw Prize in Astronomy, shared with Adam Riess and Brian Schmidt (2006).
- Antonio Feltrinelli International Prize (2006).
- Membership of the American Academy of Arts and Sciences (2007).
- Gruber Cosmology Prize, given to the members of the Supernova Cosmology Project and the High-Z Supernova Team (2007).
- Albert Einstein Medal from the Albert Einstein Society, with Adam Riess (2011).
- Nobel Prize in Physics, with Adam Riess and Brian Schmidt (2011).
- Membership of the American Philosophical Society (2014).
- Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2015, which he shared with the other members of the Supernova Cosmology Project and the High-Z Supernova Team.

Despite all these honours and recognitions, Saul has not lost any of his human qualities or his enthusiasm for new scientific challenges. That's what makes him such a beloved colleague.

One of Saul's most recent interests is the promotion of critical thinking. This means applying scientific methods (such as statistical reasoning and blind data testing) to a wide range of fields, including the news. Science students learn these methods, but it is important to extend them to society as a whole.

Equipping future generations with the critical thinking skills that underpin science is one of the best defences against confused thinking and misinformation. These two aspects represent major challenges to the ability of democratic societies to make deliberate decisions. In this respect, there is a significant overlap between the values promoted by Saul Perlmutter and the values embodied in the motto of our beloved University of Barcelona.

For all these reasons, Honourable Rector, we ask you to confer an honorary doctorate from the University of Barcelona upon Professor Saul Perlmutter in recognition of his merits. I am sure that Professor Perlmutter will accept with great pride and honour this degree that you have decided to confer upon him, at the proposal of the Faculty of Physics, the Institute of Cosmos Sciences, and the Department of Quantum Physics and Astrophysics at our University.

Thank you very much.

Discurs del professor Saul Perlmutter

Rector Magnífic,
distingits membres del Consell Social,
professores, professors, col·legues, alumnes, amigues i amics,

En primer lloc, voldria agrair-vos profundament aquest honor. Rebre una distinció com aquesta de la Universitat de Barcelona, amb la qual he treballat durant tants anys en el que s'ha estat comentant fa un moment, per a mi és molt especial. Soc conscient que en aquest context, en aquesta institució amb tanta història i en aquesta sala tan esplèndida, pot fer-se una mica estrany que em posi a parlar de temes científics en termes molt tècnics. D'alguna manera, però, crec que els temes que exposaré tot seguit encaixen prou bé amb una visió molt humana del món, perquè les preguntes que ens fèiem quan vam començar, i que ens van dur a investigar aquesta qüestió, es remunten al que potser van ser les primeres preguntes que es va fer l'ésser humà. Podeu imaginar-vos els primers humans sortint de la cova en plena nit, mirant les estrelles i preguntant-se: «L'espai en què vivim, s'acaba en algun moment? És infinit i durarà per sempre?». I potser és precisament això el que significa haver estat els primers humans: fer-se preguntes d'aquesta mena.

I el cert és que al llarg de la història no hi ha hagut gaire maneres de respondre-les més que mitjançant la contemplació filosòfica. No va ser fins al segle passat que Einstein va posar per escrit la seva teoria de la relativitat general, la qual per primer cop ens va permetre plantejar-nos algunes d'aquestes preguntes amb més rigor i precisió. El problema és que en aquest procés Einstein va topar amb un escull perquè al principi, segons les seves equacions, podia ser que l'Univers es contragués o bé que s'expandís, però no aconseguia que s'estigués quiet. Això era el que aleshores pensaven ell i la resta de la comunitat científica: que vivíem en un Univers estàtic. Arribat a aquest punt, va decidir trampejar les equacions afegint-hi un terme addicional; un truc, val a dir, que molts de nosaltres, com a estudiants de física, en un moment o altre hem estat temptats de fer servir per-

què ens sortissin els problemes. Va posar-li el nom de *constant cosmològica* i va atribuir-li la variant grega *lambda* per donar-li un aire ben formal. Tanmateix, la satisfacció no li va durar gaire, perquè dotze anys més tard Hubble i el seu equip van mesurar les distàncies que hi havia fins al que ara sabem que són galàxies llunyanes i van descobrir que el fet és que vivim en un Univers en expansió. Einstein va reconèixer que la constant cosmològica havia estat el seu desencert més gran i es penedí d'haver-la introduït. Tot seguit, però, veurem que potser no ha quedat descartada del tot.

Dit això, la idea de viure en un Univers en expansió us hauria de preocupar. El primer que us hauria de venir al cap és: «I això què significa?». Doncs és molt complicat d'entendre, perquè l'Univers ho és tot: si s'expandeix, cap a on pot ser que vagi? I justament per aquesta raó vaig pensar que seria útil començar descrivint-vos l'actual imatge que com a cosmòlegs tenim al cap quan fem servir el concepte d'Einstein d'un Univers en expansió. Això que veieu a la pantalla és una representació molt simple que he fet de l'Univers; ben mirat, potser és massa senzilla i tot. Sigui com sigui, heu d'imaginar-vos que aquests puntets que hi veieu són galàxies; cadascun és una galàxia diferent. Com podeu observar, el dibuix no és el meu fort i no he sabut representar un nombre infinit de galàxies, però us heu d'imaginar que aquesta sèrie de puntets va fins a l'infinit, cap a la dreta i cap a l'esquerra, cap al fons de la pantalla i cap a vosaltres; és un mar de galàxies que no té final. Llavors, quan diem que l'Univers s'expandeix, el que volem dir és que totes les distàncies mitjanes que hi ha entre aquestes galàxies es fan una mica més grans; és a dir, seguim tenint les mateixes galàxies, el nombre infinit de galàxies continua sent el mateix, però cada vegada estan totes una mica més lluny l'una de l'altra. Per tant, que l'Univers s'està expandint significa que cada cop hi ha més espai entre les galàxies. Aquesta petita diferència potser fa que sigui una mica més fàcil d'imaginar-nos-ho, però, així i tot, continua sent molt difícil bregar amb el concepte d'infinitat. Potser no podem dir que hàgim avançat gaire, doncs.

Ara bé, sí que ens permet preguntar-nos amb molta més exactitud si vivim en un Univers que durarà per sempre. Pel que s'ha explicat avui, ja us deveu haver fet una lleugera idea de com ho vam fer; però, com que aquest és un dels pocs exemples que conec d'un experiment de física molt bàsic que crec que tothom pot explicar a casa de manera planera i entenedora, he pensat que dedicaria un parell de minuts a ensenyar-vos com po-

dem mesurar un Univers en expansió. Només us demano que després em digueu si us ha funcionat, si quan torneu a casa i ho expliqueu a la família o a les vostres amistats us entenen o no.

Utilitzarem una eina que ens permetrà mirar al passat, perquè si volem saber si l'Univers es seguirà expandint o si deixarà de fer-ho, ara que tenim la idea d'un Univers en expansió, ens podem preguntar: «Aleshores, ha estat expandint-se sempre? I, si és així, ho ha estat fent sempre a la mateixa velocitat? I també, en aquest cas, no caldria esperar que tota l'atracció gravitatòria entre les diverses galàxies frenés el ritme de l'expansió?». El primer que hauríem de veure és si podem consultar la història per mirar d'esbrinar si en el passat aquesta expansió s'ha anat alentint o no, i fins i tot si s'ha anat alentint prou perquè això pugui repercutir en el futur.

I això com ho hem de fer? Doncs bé, com ja deveu saber, nosaltres fem servir aquestes eines que anomenem *supernoves* i que, resumidament, són estels que exploten. Quan un d'aquests estels esclata en una determinada galàxia, durant unes setmanes, mentre augmenta la brillantor i després s'extingeix, fa una llum molt potent, tan potent que pot ser més brillant que tota una galàxia d'estrelles. Això fa que pugui observar-se des de qualsevol punt de l'Univers, a distàncies molt llunyanes. En astronomia aquesta eina ens és molt útil perquè els objectes que podem veure a unes distàncies tan grans són objectes que la llum ens ha fet arribar durant un període de temps molt llarg. Així, doncs, el primer que haureu d'explicar durant la sobretaula és que la llum viatja amb el temps; és a dir, quan veiem una explosió que està molt lluny de nosaltres és que aquesta explosió va tenir lloc fa molts anys. Una supernova amb una llum prou tènue ens dona una mica d'informació sobre el que va passar en el moment de l'explosió, un milió o fins i tot mil milions d'anys enrere.

Les supernoves també ens van molt bé per un altre motiu. El tipus de supernova que vam poder fer servir, anomenat *Ia*, del qual ja heu sentit a parlar, quan esclata sempre brilla amb la mateixa intensitat. Brilla i després es va apagant, però la lluentor màxima que assoleix és la mateixa en totes les supernoves d'aquest tipus. I dic que ens van molt bé perquè la magnitud aparent —el grau de lluminositat que percebem— d'una d'aquestes supernoves ens indica la distància a la qual es troba. Aquests referents són el que es coneix com a *candela estàndard*. Així, les que mostren una llum més feble són les que estan més lluny i, per tant, més temps fa que va tenir

lloc l'explosió perquè ara ens n'arribi la imatge. I amb això ja podem mesurar el temps en el passat; només ens cal trobar supernoves que llueixin amb diferents intensitats per detectar diferents punts en la història.

L'últim que ens queda per saber, doncs, és què ha passat des d'aleshores, en quin grau s'ha expandit l'Univers des que va explotar cadascun d'aquests estels. I en aquest aspecte les supernoves també ens van d'allò més bé: la llum que ens arriba d'una supernova és blava quan explota, però, mentre aquesta llum ha anat venint cap a nosaltres, s'ha anat expandint l'Univers i, amb ell, tots els elements de l'Univers que no estaven lligats gravitatòriament, incloent-hi la longitud d'ona de la llum que emet la supernova. Així, encara que la llum comenci sent blava, quan ens arriba és de color vermell; és el que es coneix com a *desplaçament cap al roig*. I en funció de la intensitat d'aquest vermell, podem saber fins a quin punt s'ha expandit l'Univers des del moment de l'explosió. El procés és aquest: localitzem una supernova que esclata en una galàxia llunyana; al principi ens dona una llum blava, amb una freqüència d'ona curta, però seguidament la llum comença a viatjar a través de l'Univers en direcció a nosaltres i en aquest trajecte es va tornant cada cop més vermella perquè l'Univers s'ha anat expandint i ella també. Aleshores, en el moment en què ens arriba, podem calcular quina és la intensitat d'aquest vermell i, a partir d'aquesta informació, saber en quin grau s'ha expandit l'Univers des que l'estel va explotar.

I en això va consistir el projecte. Proveu d'explicar-ho a casa i a veure si la gent ho entén. Digueu, però, que no va ser fàcil, perquè encara que les supernoves puguin ser-nos molt convenients, no són pas gaire fàcils de localitzar ni de treballar-hi. Solen haver-hi poques explosions; potser en cada galàxia només n'exploten unes poques cada mil anys. I, és clar, com que a un projecte científic no hi pots dedicar tot el temps del món, vam haver de reformular el mètode. El que vam fer va ser dissenyar i crear nous instruments amb els quals no haguéssim d'observar una sola galàxia i esperar centenars d'anys, sinó que ens permetessin observar milers de galàxies alhora, fent ús de la probabilitat raonable que en una mostra tan àmplia de galàxies esclatarien diverses supernoves. Aquesta que veieu és una imatge captada per un d'aquests primers instruments. En aquesta mena d'imatges cal ignorar aquestes llums brillants que hi ha al davant, perquè són objectes relativament propers; en el que us heu de fixar és en aquestes taquetes blaves tan tènues que hi ha més al fons. Cadascuna és una galàxia llunyana, i en aquest

cas estan a una distància d'uns quatre mil milions d'anys llum. El que veieu, doncs, són testimonis històrics molt antics.

De fet, algunes de les supernoves que podem observar avui dia tenen una llum tan feble que han d'estar molt lluny; tan lluny, que la llum que emeten ha hagut de viatjar fins a deu mil milions d'anys, és a dir, dos terços de l'edat de l'Univers tal com la coneixem actualment. Per tant, era un bon començament, ja sabíem per on tirar: disposàvem d'un instrument que ens permetria mesurar milers de galàxies, i sabíem que en milers de galàxies hi havia una alta probabilitat que hi hagués supernoves. Això sí, el problema era que observar totes aquestes taquetes blaves esperant que hi aparegués una llum que fos una supernova, requeria molta feina, massa. El pas obvi que vam seguir a continuació va ser inventar tota una sèrie de programes informàtics que, mitjançant codis i anàlisis de dades, se centressin sobre els punts que volíem i ens mostressin que tres setmanes enrere aquells mateixos punts havien emès una llum més feble que en el moment del descobriment de les supernoves. Restant una imatge de l'altra obteníem la llum de la supernova i, a partir d'aquí, podíem posar-nos a treballar. Havíem trobat un mètode per localitzar supernoves i mesurar-ne la lluentor.

Pensàvem que seria un projecte molt difícil, perquè per fer els càlculs necessitàvem trobar entre trenta i quaranta supernoves, i en un principi vam estimar que això ens suposaria uns tres anys de feina com a mínim. Al cap de tres anys encara no n'havíem trobat ni una, de supernova; no va ser fins al quart o cinquè any que vam començar a trobar-ne, i fins al sisè, setè o vuitè no vam començar a localitzar-ne conjunts sencers. Finalment, al cap de deu anys teníem quaranta-dues supernoves preparades per analitzar i poder construir un relat de l'expansió de l'Univers. La intenció era traçar la distància mitjana entre les galàxies com a funció de temps i respondre dues preguntes: si l'Univers s'havia estat expandint i alentint a causa de la gravetat i si seguiria expandint-se per sempre.

Per posar-vos en situació, he preparat una animació en què us heu d'imaginar que esteu estirats a terra, mirant cap al cel, i que els vostres ulls tenen visió telescòpica i, per tant, podeu veure totes les galàxies llunyanes. Ara, en aquest escenari, l'Univers s'expandeix infinitament: tot es va allunyant de nosaltres i tots els objectes es distancien els uns dels altres, cada cop més a poc a poc però eternament. Aquesta és la primera possibilitat. La segona és més emocionant, per dir-ho d'alguna manera. En aquest cas

tenim un Univers que s'expandeix a un ritme cada vegada més lent, fins que arriba un moment en què hi ha prou material a l'Univers perquè aquest s'aturi i seguidament comenci a contraure's fins a acabar col·lapsant-se. És a dir, tant en una possibilitat com en l'altra, el procés és idèntic al principi: l'Univers comença expandint-se cada cop més a poc a poc. La diferència és que, en la segona, l'Univers acabava girant cua i iniciant el procés contrari, i és aquí que comenceu a mossegar-vos les ungles perquè això significa que, en efecte, l'Univers té data de caducitat. En certa manera, el destí de l'Univers podria ben ser aquest.

En definitiva, estàvem molt emocionats de tenir aquestes quarantadues supernoves. Només ens faltava col·locar els punts en la línia temporal i descobrir quina de les dues possibilitats era la bona. I, encara que qualsevol de les dues hauria estat un resultat fantàstic, com ja sabeu la resposta no va acabar sent ni l'una ni l'altra. Ni l'Univers continuarà expandint-se cada vegada més lentament i per sempre, ni tampoc s'aturarà i es col·lapsarà: el fet és que l'Univers s'està expandint cada cop més de pressa. La sorpresa va ser enorme. Significa que l'expansió de l'Univers va prenent cada cop més i més velocitat, fins que ben aviat no veurem les altres galàxies. En aquest sentit, he repetit diverses vegades a les agències de finançament estatals que ara és el moment de fer tota la recerca astronòmica, perquè d'aquí a uns quants milers de milions d'anys ja no podrem veure cap altra galàxia; però també he de dir que no sé si els ha convençut pas gaire, aquest argument.

El que ens indica aquesta troballa tan sorprenent és que vivim en un Univers que és diferent del que ens pensàvem que coneixíem. No tenim clar si resulta que la major part de l'Univers està feta d'aquesta energia que anomenem *energia fosca* —en diem *fosca* per la nostra ignorància, perquè no sabem ben bé què és—, ni tampoc sabem del tot si aquesta energia està estenent-se per tot l'espai i causant aquesta acceleració. També podria ser que calgués tornar a reformular la teoria de la relativitat d'Einstein, com avançava abans, la qual cosa seria molt colpidora i desconcertant; però, fet i fet, també ho és la idea que la major part de l'Univers estigui composta d'una energia mai vista fins ara. El fet és que no podem descartar cap d'aquestes possibilitats.

Com calia esperar, tal misteri ha sacsejat de dalt a baix la comunitat cosmològica i ha dut el món de la física a intervenir-hi per mirar de treu-

re'n l'aigua clara. Hi ha una quantitat aclaparadora d'articles que intenten explicar el que ha passat; de fet, diria que la mitjana en els últims vint anys ha estat de més d'un article publicat cada vint-i-quatre hores. I, és clar, la qüestió desperta la creativitat de tothom i la gent s'inventa teories que proven de narrar els fets i que tenen noms d'allò més fantàstics. En particular, a mi m'agraden les hipòtesis de la gran estripada, l'Univers ecpiròtic o la quinta essència, però si pregunteu a qualsevol d'aquests físics, a qualsevol d'aquests teòrics, si la seva teoria conté la resposta correcta, amb molt de gust us diran que no ho saben, que tan sols miren d'ampliar el ventall d'idees, i després acudiran als experimentalistes i als observadors i ens diran que necessiten més informació sobre les propietats d'aquesta energia fosca per determinar quin d'aquests models hipotètics podria funcionar.

Faig broma, però el cas és que hem estat treballant de valent per mirar de trobar quina informació podríem oferir a partir de l'anàlisi de les propietats de l'energia fosca. I una altra cosa interessant és que, fins i tot quan vam obtenir aquest primer resultat, ja sabíem que seria un projecte molt llarg, amb molt de temps entre una etapa i la següent, perquè per poder analitzar totes aquestes diverses hipòtesis que explicaven què era l'energia fosca necessitàvem un mètode de mesura que fos vint vegades més precís que els que havíem fet servir fins aleshores. I això, traduït en temps, era bàsicament una o dues dècades de treball, un marge suficient per inventar noves tècniques que ens permetessin assolir molta més precisió i també per poder utilitzar una o dues tècniques que haguessin inventat altres persones. I vam haver de construir nous instruments, nous telescopis, per provar aquestes tècniques, i el que avui ens fa molta il·lusió anunciar és que estem a punt d'embarcar-nos en una nova generació d'experiments que ja han estat dissenyats. Així, tenim nous instruments que funcionaran des de la superfície terrestre i en tenim d'altres, encara en construcció, que prendran les mesures des de l'espai.

I dic que ens fa molta il·lusió perquè tota aquesta feinada la vam haver de fer com a pas previ a poder fer els mesuraments, i ara mateix som en un punt en què tot això ja ho tenim fet i ja ens podem posar a mesurar. En altres paraules: estudiants, postdoctorands i joves científics que esteu entre el públic, aquest és el moment idoni per fer recerca, perquè aquesta és l'oportunitat d'or per desxifrar l'enigma, per saber què és el que està passant en aquest Univers en expansió. És cert que no hi ha res segur, que

ningú no pot garantir-nos que els mesuraments que fem ens donin les respostes, però també ho és que la cosmologia és un camp relativament jove i que cada cop que hem fet mesuraments més precisos ens hem trobat amb més sorpreses i resultats engrescadors. Per aquesta lògica, confio plenament que en aquests pròxims cinc o deu anys durant els quals anirem fent totes aquestes noves operacions, anirem fent més troballes i traient conclusions ben interessants.

M'agradaria acabar aquesta intervenció reprenent el fil que connecta tot això que acabo d'explicar amb aquesta visió més humana del món de la qual parlava fa una estona. Deixeu-me que exposi breument el que crec que hem après mentre descobríem que l'expansió de l'Univers s'accelerava. Primer de tot, penso que hem après coses pràctiques, com ara que hi ha problemes en els quals val la pena treballar durant llargs períodes de temps. Abans he dit que el que inicialment ens pensàvem que seria un projecte de tres anys, al final ens va acabar exigint una dècada, que vam trigar vint anys més a fer el pas següent i que ara estem tot just a punt de començar una nova etapa. Crec que cap de les persones que participen en el projecte està descontenta: estem aprenent moltes coses i som conscients que resoldre problemes tan complicats és apassionant però demana anys de dedicació; potser deu, vint, com hem vist. I aquest és un aprenentatge que m'agradaria compartir: no tots els problemes del món es poden resoldre de manera immediata, sinó que n'hi ha que ens demanen ser pacients i treballar col·lectivament durant molt de temps fins que trobem quines coses funcionen i quines no, i així anar millorant. Penso que avui dia aquesta paciència és molt necessària a l'hora d'intentar abordar els grans problemes de la nostra societat.

També voldria dir que soc del parer que la ciència és molt més social del que la gent es pensa. Hi ha en l'imaginari col·lectiu el típic científic vestit amb bata blanca —no pas així com vaig ara— que treballa tot sol al laboratori, però aquesta no és ni de bon tros la meva experiència. Jo m'he mogut en un context en què sempre s'ha treballat en equip, entenent que la millor manera de resoldre els problemes és ajuntar persones diferents amb bagatges molt diversos. Aquesta nova generació d'idees és un producte col·lectiu de la comunitat científica de tot el món. I aquest component social de la resolució de problemes és una altra de les lliçons que hem après en aquest trajecte i que m'agradaria traslladar a la resta de la societat:

no es tracta de competir els uns amb els altres per veure qui té la raó; de fet, ens ajuntem amb altra gent per mirar de veure què podem fer junts, en el sentit que la majoria de problemes de difícil resolució necessiten una posada en comú de les idees de tothom.

I potser tan important com qualsevol altra cosa és la idea que, en ciència, es tracta d'estar obert a equivocar-se. En realitat, gran part del que fem és intentar trobar en què ens hem equivocat. Ens hem equivocat en un detall del mesurament? Ens hem equivocat en una qüestió de concepte més ampli sobre com funcionen les coses? Dedicar-nos constantment a detectar els errors que anem cometent, penso que precisament és una manera molt humil de fer una feina tan arrogant com aquesta. A més, si assumim que tots necessitem ajuda per identificar els passos que hem errat, es fa molt més fàcil ajuntar-nos i treballar plegats que no pas si ens dediquem a intentar convèncer-nos els uns als altres que qui té raó som nosaltres. Aquesta és una altra de les lliçons que m'agradaria que la ciència pogués ensenyar a la resta de la societat. I és que una de les coses en què he estat treballant els últims anys és exactament això: preguntar-me de quina manera podem extrapolar aquests plantejaments de la ciència i aplicar-los a l'hora de pensar el món i la societat, perquè crec que tots necessitem aquesta ajuda col·lectiva per definir quines han de ser les etapes següents en la resolució d'un problema. Si fem bé això, a mi els grans problemes del món ja no em preocupen, perquè penso que junts serem capaços de resoldre'ls. Tinc moltes ganes de saber com serà la propera generació científica.

Moltes gràcies.

Speech by Professor Saul Perlmutter

Honourable Rector,
Distinguished Trustees,
Faculty, Colleagues, Students and Friends,

First, I should thank you very warmly for this nice honor. I think that it means more to get something like this from Barcelona, the University of Barcelona, since it is a place that I have worked with for many years in the work that you have been hearing about. And I realize that giving a talk today in a very historical setting of a university that has such a long history and in such a beautiful room, it feels a little bit odd to speak about very technical scientific topics. But in some sense I think that the topics I will be describing today actually fit quite well in a very human-centered world, because the questions that we were asking that brought us to work on this topic in the first place go back to what were maybe the very first questions a human being may have ever asked. You can imagine that the very first humans walking outside of their caves at night would have looked up at the stars and found themselves wondering: do we live in a space that goes on forever, is it infinite, and will it last forever? And perhaps that is what it means to have been the very first humans: that you would ask such questions.

And for most of history there have not been very many ways to answer those questions except through philosophical contemplation. And it was not until just this past century that Einstein set down his theory of general relativity, and this for the first time gave us a way to make some of these questions more rigorous, more precise. He actually ran into a problem when he did this because he first had a universe that could contract or he had a universe that could expand, but he did not see a way to make a universe that would just stand still. And as far as he and the scientists at the time knew, we lived in a static universe. So he ended up using a trick: he put an extra term into the equations. Many of us, as physics students, have at some point or other been tempted to do this to make our problems work out. And in his case, he called it the cosmological constant

and he gave it the Greek variable lambda so it sounded very formal. But in the end it was very unsatisfactory to him when just about a dozen years later, Hubble and his colleagues measured the distances to what we now know are distant galaxies and discovered that we actually live in a universe that is, in fact, expanding. And at that time Einstein called this cosmological constant his greatest blunder. He felt he should never have introduced it. Later we will see that it actually may return to the story.

But having this idea of a universe that is expanding should trouble you. You should find yourself immediately thinking, what could that possibly mean? It is a very mind-boggling idea. Because the universe is everything; what could a universe expand into if it is already everything? And so I thought maybe I would begin by just describing what the current picture is that we have in our minds as cosmologists when we use Einstein's idea of an expanding universe. And I ended up drawing a very simple picture of the universe. As you can see it is maybe too simple; it consists of dots and you are supposed to imagine that these various dots that you see are just different galaxies. And each of these dots represents a galaxy. And since I cannot draw very well I could not draw an infinite sea of galaxies, so you have to imagine that this array of dots goes off infinitely to the right and infinitely to the left; there is an infinite number of them going into the screen and out toward you, and it is just an infinite sea of galaxies. And then when we say that the universe expands, all that we mean is that all of the average distances between those galaxies just get a little bit bigger. So we still have all the same galaxies, still all the same infinite array of these galaxies, it is just that they are all a little bit further apart from each other. So the only thing that is expanding is that we are adding extra space between all of the galaxies. So that slight difference makes it possibly a little bit easier to imagine, although in the end our brains have a very hard time with the infinite in the first place. So it is not necessarily a huge improvement.

However, it does allow us now to ask the same question about whether we live in a universe that will last forever in a very rigorous way. And you heard a little bit about how we did that in the talks today, but because this is one of the only examples I know of, of a very fundamental physics experiment that everybody, I think, can explain to their friends, that people can understand, I thought I would spend an extra minute or two showing you

how it is that you can measure an expanding universe. And you will have to let me know later whether this works for you, if you can take the idea home and try it out with your family and friends at home over dinner and see whether or not it is understandable.

To start with, we are using a tool that allows us to look back into the past. Because if we want to know whether or not the universe will expand forever, now that we have this idea of a universe that is expanding, you could ask, well, has it always been expanding, and has it always been expanding at the same speed? And would you not expect that all of the gravitational attraction between these different galaxies would slow that expansion down? So the first question you might ask is, can we look into the history and see whether or not it was slowing down, and perhaps slowing enough to make a difference to the future?

So how do we do that? Well, you have heard that we are using these tools called supernovae. These are exploding stars, meaning that, in a given galaxy, one star explodes and just for those few weeks as it brightens and fades away, that one star is tremendously bright. It can be brighter than an entire galaxy of stars in the universe. And so you are able to see it at amazing distances across the universe. In astronomy that is a very useful tool because you can see it at vast distances away from you and what you are seeing is something where the light has had to travel to us over a long period of time. So this is the first point that you would have to explain over dinner, that the light takes time to travel. So if you are seeing something very far away, you are seeing an explosion that occurred a long time ago. And a supernova that is faint enough is giving you a bit of history about what happened at the time of this explosion, say, a million or even a billion years back in time.

Now, the supernova also is very convenient as a tool for another reason. This is that the kind of supernova that you were hearing about that we were able to use—called a Type Ia—always shines with the same brightness when it explodes. It brightens and then fades away, but it reaches this peak brightness that looks the same from one supernova to another. And that is very convenient because you can use the apparent brightness—how bright it appears to us—to tell how far away that particular supernova is. So the fainter ones are further away. We call this a standard candle for obvious reasons. So the fainter the supernova is, the further away it is, and

hence the further back in time the explosion must have occurred for it to reach us today. So those are actually all the tools that we need to make a measurement of history. All we have to do is find supernovae shining with different brightnesses and these represent different times back in history.

And the last thing we want to know is, what was going on since that time in history? How much has the universe expanded since each of these different supernovae exploded? And there, too, the supernovas are very convenient. Because the light that comes to us from a supernova that explodes looks blue when it explodes, but while the light travels to us the universe has been expanding, and everything in the universe that is not held together expands with the universe and that includes the very wavelength of light of the supernova. So although it begins blue, by the time it reaches us the supernova looks red. It's called redshift. And how red it gets tells you how much the universe has expanded since that one explosion. So we look for a distant supernova in one of these distant galaxies and it explodes over there. It then gives off blue light, a short wavelength. That light starts to travel across the universe to us, and it expands and becomes redder and redder as the universe expands and then when we see it we just read off how red the light is. That tells us how much the universe has expanded since that one supernova exploded.

So that is the entire project, and you should try this out to see whether people can understand it. But you might add that it was not easy, because even though it sounds very convenient to have these supernovae, they are not very easy to find and to work with. They only explode in any given galaxy a few times; a supernova explodes in one of these galaxies maybe a few times per millennium. You only have so much time to wait around to do your science project, and so this was not very convenient for us. So what we ended up having to do was develop and invent new instruments to take to the telescopes that would allow us to observe not just one galaxy and wait for hundreds of years but thousands and thousands of galaxies. So that we could use the reasonable probability that several supernovae would explode in those thousands of galaxies. So this is what an image looks like from one of the first instruments of this kind that were built to look at large numbers of galaxies all at one time. In an image like this you are supposed to ignore the beautiful bright things in the front because those are relatively nearby objects. And what we are paying attention to are all these

very faint blue specs in the background. And each of those little blue specs in the background is a distant galaxy, and in this case these are some four billion years away that the light has been traveling to us. And so we are looking at vast times back in history.

In fact, today we are able to see that some of the supernovae we are observing are so faint that they must be very far away—so far away that the light has been traveling for some 10 billion years, which is two thirds of the entire life of the universe as we know it. So this was a good start, we now had a way, an instrument that would allow us to measure thousands of galaxies, and there are likely to be supernovae in those thousands of galaxies now. The problem is, it is way too much work to try to look through every one of these little specs of blue to find a new light with a supernova on it. So that was obviously the work of a lot of computer programming and data analysis, and we invented all sorts of computer programs that would allow the computer to home in on the spot right there and show us that this spot three weeks earlier is fainter than this spot three weeks later where the supernova discovery is. If you subtract this image from this image, you are left with just the light of the supernova and now you can actually do the work, now you actually have a way of finding the supernovae and measuring their brightness.

And we thought this was going to be a very difficult project because we needed to find some 30 to 40 supernovae to make the measurement, and we originally said it would probably take us at least three years to do this. At the end of three years, we still had not found a single supernova. It was not until four or five years had gone by that we found our first ones; it was not until six, seven, or eight years had gone by that we started finding whole batches of supernovae. Finally in the 10th year, we had 42 supernovae that we were ready to look at and to plot on a history of the expansion of the universe. So we wanted to make a plot of the average distance between galaxies as a function of time and answer two questions: has the universe been expanding and slowing because of gravity, and will it go on expanding forever, or not?

Just to imagine what this looks like, I have done a bit of an animation here where you are supposed to imagine that you are lying on your back looking up at the sky, and I guess you have telescopes for eyes and so you can see all the distant galaxies. And now in this scenario the universe ex-

pands forever, everything gets further from us and from each other and it slows down but it will always expand. So that was scenario one. Scenario two was actually much more exciting in a sense. In this case you could imagine a universe that was at first slowing down but perhaps there was enough material in the universe for it to come to a halt and then collapse again, and then the universe would end in a big crunch. So this looks very similar at the beginning; it begins expanding and slowing down, but in this universe eventually it turns around and starts coming back in and at about this point you start getting quite nervous because, in fact, this universe really does come to an end. And so in some sense the fate of the universe could be this as well.

So we were very excited to have 42 supernovae in our hands. We were going to put the points on this plot and find out where we were, which of these scenarios we lived in. And proving either one would have been a wonderful result, but of course as you heard the answer turned out to be neither of the above. The universe is not slowing down forever or coming to a halt and then collapsing; it is actually speeding up. And that was a huge surprise. Apparently the universe is beginning this expansion, and then, faster and faster, it will just go whoosh! And pretty soon you will not see any other galaxies. In fact I have been telling the government funding agencies that we have to do all of our astronomy now, because in a few billion years we will not be able to see any other galaxies. But I am not sure the argument is working...

The surprising result apparently means that we live in a universe which is different than we thought. And we do not know whether it is because most of the stuff in the universe is going to turn out to be made of this new energy that we are calling dark energy—dark, just to express our ignorance, because we do not know what it is. And it is possible that a dark energy is pervading all of space and is causing this acceleration. It is also possible that Einstein's theory of relativity will actually need some new modification. That would be really shocking and amazing, but on the other hand, so is the fact that most of the universe is made out of a new energy we have not seen before. So we have to be open to these possibilities.

And this mystery has of course rocked the entire cosmological community, and the physics community has gotten involved in trying to understand what is going on. And paper after paper after paper is being writ-

ten to try to explain the story. In fact, I believe that in the last 20 years more than one paper on this topic has been published every 24 hours on average to try to explain what is going on. So it obviously brings out everybody's creativity, and they invent wonderful names for these theories of what could be going on. I like the Big Rip Cosmologies and the Ekpyrotic Universe and the Quintessence, but if you ask each of these physicists, each of these theorists if their theory is the right answer they will cheerfully reply that they do not know, that they are just trying to expand the range of ideas, and they will then go back to the experimentalists and the observers and tell us they need to know more about the properties of this dark energy to figure out which of these theories could be right.

It is the case, though, that we have been working very hard at this and I'm speaking tongue in cheek, of course; we have been trying very hard to see what information we could give the theorists by studying the properties of dark energy. But what is interesting is that even at the time when we saw this first result, we knew that this was going to be a very slow project, a very slow process from one stage to the next. And the reason is that in order to tell apart these different explanations for dark energy, we needed to make a measurement that was 20 times more precise than we had ever done before. And that meant that we needed basically a decade or two of work to invent the new techniques that would allow us to make the same measurements 20 times more precise and to make it possible to use one or two other techniques that people invented; and we had to build new instruments, new telescopes to test these techniques, and the amazing thing today is that we are about to embark on the next generation of experiments that have all been built. So you will see new instruments, new telescopes that allow us to start to make these measurements. These are all the ones on the ground, and there are new instruments that are being built for space, that will allow us to do this next generation of experiments in space.

And it is a very exciting time because we had to do all of that background work to be ready to make this measurement, and you are all living at a time when the measurements are just about to start. So for all the students and postdocs and young scientists here, this is the perfect time to be exploring, because this is our chance to figure out what is going on, what is happening in this expanding universe. We do not get any guarantees; nobody can guarantee to us that the measurements we make will give us

the answers. On the other hand, it is also true that cosmology is a fairly young field, and every time we have made more precise measurements, we have found out new surprises and new exciting results. So since we are about to make this next generation of measurements these next five, 10 years with all these new instruments, I am actually expecting that we will get some new surprises and new exciting results.

Now let me finish today by just going back to how this ties to this much more human world that brings us back to the whole university of a thousand years. And let me say a few words about what I think we have learned while we learned that the universe was accelerating. First of all, I think we have learned some practical things, like some problems are worth working on for a long time. I mentioned that we thought it was going to be a three-year project and it took 10 years. I mentioned that the next step of the project took us another 20 years. And now we are about to start this next round of the project. None of the scientists, I think, are unhappy. I think we are learning a lot and it is exciting, but a really good problem is worth spending, you know, 10, 20 years on. And I think that is something I would like our society to understand: that we do not expect to solve every problem in the world instantly, but you solve them by being patient and working together over a long period of time until you figure out which things work and which things do not work and you do things better. And I think that that kind of patience is something our world could really use now as we try to address the big problems of our world today.

I also think it is interesting that science is much more social than most people realize. There is a common picture of the lone scientist wearing a lab coat—not this—and going off into a laboratory by himself or herself, but of course that is not my experience at all. I have been living in a world where everything we do is a group activity, where we bring together people who have all sorts of expertise. And smart people working with each other are much more able to solve problems. In the end this turned into work in which the whole community around the world was developing these ideas together, and we are developing the next generation of ideas together. And I think that social aspect of problem-solving is one of these lessons from science that I also would love to share with the rest of society. That you do not just fight with each other over who is right. You actually come together and try and figure out how we can figure out

what we are doing together, because most hard problems need everybody's ideas together. And I think that is another aspect of science that we have learned in this kind of activity.

And maybe as important as anything else is the idea that science is about being open to being wrong and that most of the work you are doing is trying to figure out how we are wrong this time. Are we wrong in the small aspect of our measurement? Are we wrong in some big picture of how things work? And it is a very humble approach to a very arrogant job that you have to be constantly looking for what are you doing wrong now. And I think it makes it much more possible for people to come together and work together if everybody needs help figuring out how are we making a mistake this time instead of people trying to convince each other that they are right. And I once more think that would be part of what I would love science to be able to share with society at large. So one of the things I have been working on in recent years is asking if we can start learning how to teach these approaches of science to thinking about the world, and that with the whole society, since I think we all need that help trying to figure out how to negotiate the next stages of problem-solving together. And I think if we do this right then I am not worried about any of the big problems of the world. I think that we will be able to solve those together, and I am very excited about what our next generation of science is going to look like.

So thank you very much.

UNIVERSITAT DE BARCELONA
Edicions