

PRESENTACIÓ

Vivim en una època en què la tecnologia ha omplert completament les nostres vides. La televisió, els ordinadors i els telèfons mòbils, a més de molts altres avenços tecnològics, formen una part indissoluble de la nostra quotidianitat. La medicina i la superació tecnològica de moltes de les nostres limitacions físiques en són un avenç. La màgia de la tecnologia ens ha enlluernat, malgrat els retrocessos mediambientals, i ens ha fet creure que la nostra visió del món ha canviat profundament, quan la realitat és tota una altra. El canvi de la nostra concepció del món que la tecnologia ens ha donat representa només una petita engruna davant de la immobilitat permanent dels nostres prejudicis del passat. Hem variat els nostres costums gràcies als nous avenços tot ignorant, com sempre ha ocorregut al llarg de la història, la paternitat que els ha fet possibles i que permetria, si ens hi atanséssim amb humilitat, modificar pregonament la nostra visió de les coses i canviar, si calgués, l'actitud de les nostres vides.

La paternitat ans esmentada té un nom: la ciència. En la immensa majoria dels mitjans de comunicació escrita, aquesta paraula és senzillament ignorada. Ara apareixen sovint articles científics, és veritat, però dins d'apartats que no els pertoca i, encara que hi ha excepcions a la regla, aquests no tenen un encapçalament científic pròpiament dit. Malgrat que es digui el contrari, el coneixement que la ciència ens aporta no interessa gairebé ningú i la tecnologia, eina meravellosa per altra banda, l'ha portada a l'exili.

La cultura és la nineta dels ulls de tothom. Dins de la cultura hi caben munió d'aspectes aparentment inconnexos, però en cap cas la ciència. Als diaris poden aparèixer articles seriosos de literatura, art o filosofia, però gairebé mai de la ciència i, quan ho fan, parlen a voltes amb una superficialitat vergonyant. La ciència és foragitada dels àmbits culturals, on sovint és mantinguda una visió fossilitzada del que és el món. D'aquesta manera les qüestions més vitals de l'existència continuen sense tenir una formulació pròpia del nostre temps, lligats i atemorits com estem, davant d'unes velles idees que impedeixen qualsevol alliberament efectiu. Vivim en el segle XXI, però la nostra visió està ancorada en conceptes molt anteriors al segle XX.

Dins de la comunitat científica les velles concepcions de la realitat s'abandonen o s'enriqueixen amb noves aportacions i els nous paradigmes són acceptats. Semblaria, doncs, que en aquests ambients la ciència podria recuperar aquella dignitat perduda. Tanmateix, tot plegat és una il·lusió. L'actitud positivista hi preval generalment i de les noves teories només s'emfatitza prioritàriament el càlcul precís en la previsió de dades experimentals, amb les seves repercussions en el camp tecnològic. Mentrestant, s'afirma

dogmàticament que no cal anar-hi més enllà, tot oblidant que l'home és un ésser reflexiu, per a qui és consubstancial preguntar-se sobre allò que les teories científiques signifiquen realment.

És urgent, doncs, que els homes i dones del nostre temps sàpiguen el que la ciència representa i això en un doble vessant. Per una banda, cal que la gent conegui el que la ciència ha descobert al llarg del proppassat segle XX i així la seva visió del que és el món es modifiqui profundament; i per una altra, s'ha de fer un salt, sovint intuïtiu i no exempt de possibles errors, perquè aquest nou coneixement ens ajudi per canviar la nostra actitud a la vida, altrament ens serviria de ben poc a la majoria de nosaltres.

Són aquests dos aspectes els que s'aniran desenvolupant a partir d'ara d'una forma mitjanament precisa i allunyada dels tecnicismes que no n'afavoririen la comprensió necessària. Donada la meua formació en un camp molt concret, la física, el llibre que teniu a les mans parlarà essencialment de la física del segle XX, al llarg de dos apartats amb intencions ben distintes (al final tenim un annex, per aprofundir en la relativitat restringida, i un conjunt d'anotacions al text):

- *Física del segle XX.*
- *Reflexions entorn de la física del segle XX.*

A la *Física del segle XX* hi ha les *conclusions* teòriques a què la física ha arribat durant l'esmentat segle XX. Tot el que seguirà es recolzarà en les noves concepcions físiques que al llarg del segle XX han revolucionat la visió del nostre món: *la relativitat, la física quàntica i els sistemes caòtics*. Ens circumscriurem fonamentalment entorn del *model de Robertson-Walker* per a l'estudi global de l'univers i en el *model estàndard* per a l'estudi de les partícules i de les interaccions entre elles. Només anirem molt tímidament més enllà del que acabem de dir, ja que els nous terrenys per on es desenvolupa la recerca teòrica actual són sovint massa especulatius i poden canviar de forma imprevisible en un futur proper. Tanmateix, hi trobarem suficients afirmacions que ens obligaran a "desaprendre" moltes de les coses que hem après i que donàvem per certes. Caldrà també abandonar alguns dels nostres còmodes paradigmes que teníem molt arrelats. Això serà dolorós, però caldrà fer-ho. No hi ha un altre camí. Si no ens sorprenem i no ens escandalitzem davant del que llegirem, en paraules de *Bohr*, no podrem arribar a "entendre" el que els nous principis físics signifiquen de veritat, ni tampoc *atansar-nos amb una ment oberta i sense prejudicis a noves realitats*.

A les *Reflexions entorn de la Física del segle XX* s'introdueixen alguns principis nous, passem de puntetes a través dels teoremes de *Bell* i de *Gödel*, i es fonamenten parcialment algunes conclusions, on les hipòtesis agosarades que hi apareixen serien equivalents a les intuïcions poètiques de qualsevol poema convencional.

A qui va dirigit aquest llibre?

- En primer lloc, aquest llibre pot servir com un primer pas que ajudi *tots* els homes a conèixer aquelles conclusions essencials a què la ciència física ha arribat i així la seva visió del món sigui *trasbalsada*, d'acord amb el temps que els ha tocat viure.
- En segon lloc, aquest material va adreçat als professors, per als quals *una part* d'aquests apunts podria servir perquè els nostres alumnes coneguessin qüestions essencials que al segle XXI no poden romandre amagades per més temps. Altrament, dels nostres centres educatius sorgirien, avui, joves desinformatats i, demà, adults ignorants amb pretensions d'una racionalitat elevada basada en falses premisses sobre la realitat del nostre món físic. La tasca, doncs, que el sistema educatiu té al davant és indefugible.

Aquest és un llibre de física que parlarà del nostre univers *físic*, el visible i l'invisible, i que ens pot ajudar a anar personalment més enllà d'ell d'una forma nova i allunyada dels camins de les creences ingènues o de les crítiques racionals que no tenen en compte el llenguatge amb què la física parla als homes d'avui.

INTRODUCCIÓ

* L'any 1905 *Albert Einstein* publicà la seva *teoria de la relativitat especial*. Ella fou seguida per un conjunt de descobriments teòrics fonamentals en el camp de la física que han canviat profundament la nostra visió del món, visió que la majoria de la humanitat no ha fet seva encara. El nom de la teoria es fonamenta en aquestes dues consideracions:

a) *Relativitat*: La visió que les persones tenim de la realitat de l'espai i del temps depèn de la manera en què ens moquem els uns en relació als altres. Això, aparentment absurd, és el que afirma la teoria. En Pere pot veure que dos esdeveniments són simultanis i en Joan pot mesurar que un esdeveniment és posterior a l'altre. La Maria pot creure que la longitud d'un objecte és de 3m i la Joana pot mesurar una de ben diferent. Per a la visió comuna que els homes tenim de la realitat física la simultaneïtat i les longituds són conceptes absoluts, independents dels nostres moviments, però la veritat és tota una altra i ells són relatius d'acord amb aquests.

L'home irreflexiu afirma que tot és relatiu, com diu el "sentit comú" tan arrelat a la nostra societat actual. No ho diu la ciència? Quin mal tan gran ha fet la teoria d'*Einstein* amb el seu nom, quan hom fa referència a ella sense conèixer-la! Perquè, en realitat, allò que la teoria afirma és que hi ha conceptes absoluts, que veurem més endavant i que són independents del nostre moviment, a partir dels quals es comprova que els conceptes que els homes ens hem forjat evolutivament, en contemplar el món que ens envoltava, són uns conceptes aplicables únicament a una experiència limitada de la realitat: aquella en què els nostres moviments en relació als dels altres tenen velocitats molt minses comparades amb la velocitat de la llum en el buit, que és d'uns 300.000 km/s. Els homes s'havien posat d'acord que les longituds i la simultaneïtat eren les mateixes per a tothom perquè així els ho deia la seva experiència que només podia contemplar velocitats entre les persones molt més petites que les de la llum!

b) *Especial*: El qualificatiu prové de l'absència de la gravitació en la teoria. La gravitació serà introduïda en la *teoria de la relativitat general*.

Les lleis físiques que contempla la relativitat especial són també en cert sentit absolutes i han de romandre invariants en la seva forma per a tots nosaltres independentment, entre altres coses, del nostre moviment. L'anterior afirmació implica l'equivalència entre la massa i l'energia, a través de l'equació més famosa de la física: $E=mc^2$, on m és la massa d'un cos, E l'energia que conté i c la velocitat de la llum en el

buit. Aquesta relació, allunyada d'aquella pobra experiència dels nostres avantpassats, és una conseqüència immediata de la formulació matemàtica amb què la física expressa les seves lleis.

La realitat és sempre més àmplia que la que contemplem a través de les nostres experiències, sempre *limitades*, i les conclusions teòriques que n'obtenim, d'aquelles experiències, ens mantenen permanentment allunyats de la comprensió *plena* de la realitat del món.

La relativitat especial ens ha fet veure que els *atributs* que havíem donat a la simultaneïtat eren incorrectes. Un canvi del significat de les paraules permet, doncs, ampliar l'abast de la realitat coneguda i anar superant les limitacions de la nostra visió del món. *Només amb aquest esperit de renovació podrem estar oberts a noves i insospitades realitats.*

* L'any 1915 *Albert Einstein* donà a conèixer la seva teoria de *la relativitat general*. En ella s'estudiaven les propietats i acció del camp gravitatori de tal manera que els seus resultats eren compatibles amb la teoria de la relativitat especial. La teoria gravitacional prèvia a la relativitat general era la mecànica d'*Isaac Newton*, que en els àmbits concrets en què s'aplicava donava excel·lents fruits. Tanmateix, la mecànica newtoniana no respectava les conclusions de la relativitat especial; en efecte: la força d'atracció gravitacional entre dues masses depenia de les seves posicions en *el mateix instant*, amb la qual cosa era necessària la transmissió instantània de l'acció gravitatòria, tot ultrapassant la velocitat de la llum en el buit, que no és permesa per la relativitat especial.

Podem trobar observadors molt particulars que dins d'un camp gravitatori contemplin el món del seu entorn durant un període de temps petit com si ells fossin aliens a la presència d'aquell camp. Així, suposem un grup de persones que inicialment es llança des d'un avió amb els seus paracaigudes tancats i que totes elles no estan sotmeses a cap altra força a part de la de la gravitació. Què contemplaria l'Enric, per exemple? Veuria que la Núria i tota la resta de companys es mourien en relació a ell a velocitat constant (això és exactament el que comprovaria un astronauta, en absència de gravitació, si es desplaçés sense acceleració en relació al fons dels estels fixos; diem que ell seria un *observador inercial* i veuria que els objectes que l'envoltessin i no estiguessin sotmesos a cap força es mourien a velocitat constant). Tanmateix, l'anterior només seria cert en un petit entorn de l'Enric i durant un temps petit, ja que, en ser atret tothom cap al centre de la Terra, fora d'aquelles condicions cadascú veuria moure's als altres amb una velocitat lleugerament variable.

Aleshores, la idea genial d'*Einstein* fou la de trobar una formulació matemàtica de la gravitació, *que fos una generalització de la relativitat especial* i que permetés la

presència d'aquells observadors concrets, com a casos particulars, observadors que *localment* veurien el món (proper i durant un temps petit) exactament igual a com el veuria un observador inercial: es tracta d'una de les múltiples formulacions del *principi d'equivalència*. La teoria de la relativitat general apareix com una conseqüència de l'esmentat principi i és la més bella de les teories físiques existents a causa de la senzillesa de la seva formulació matemàtica.

D'aquesta teoria es desprenen un nombre molt elevat de prediccions, que més tard han estat confirmades en part. Nous experiments podrien confirmar-ne en el futur, potser, la resta. En el capítol corresponent tot això està desenvolupat parcialment. Tanmateix, semblaria que l'anterior és massa teòric i sense cap mena d'influència en les nostres vides, però no és així. La teoria de la relativitat general aplicada a l'estudi global de l'univers permet afirmar que aquest està en expansió. Si reculéssim cap al passat, tot l'univers estaria concentrat i en contacte íntim i a partir d'aquest estat primigeni hauria sorgit la matèria i l'energia de l'univers: es tractaria del *Big Bang*. L'anterior model ha estat plenament confirmat per les observacions que s'han anat fent a l'univers.

La matèria/energia i l'espai/temps estan totalment relacionats en relativitat general, a través de l'*equació d'Einstein*, de tal manera que amb el Big Bang haurien nascut també l'espai i el temps, conjuntament amb la matèria i l'energia. L'univers no s'hauria creat *en* el temps, sinó *amb* el temps, com ja va intuir *Sant Agustí*, fa molts de segles. En aquests moments primordials la densitat de la matèria seria infinita (diem que hi ha una *singularitat*), la teoria de la relativitat general deixa de tenir un significat matemàtic clar i les nostres paraules s'allunyen més i més d'allò que pugui ser la realitat que s'hi amaga.

Amb la teoria de la relativitat especial hem canviat el significat de les paraules i això ens ha permès ampliar la realitat habitual que tots coneixem. Tanmateix, la teoria de la relativitat general ens aboca a l'esfondrament de les pròpies paraules que ja no ens serveixen per reflexionar sobre una realitat que s'esmuny. Des d'aquest moment ja no ens serà possible sortir del pas amb un canvi només del significat de les mateixes paraules, sinó que haurem de substituir-les per unes de noves. Quines hauran de ser, però, aquestes altres paraules que ens permetin parlar d'una realitat que s'ens escapa? Les trobarem en la física quàntica.

* Gràcies a les aportacions de molts físics, la *física quàntica* es va anar desenvolupant al llarg dels segles XIX i XX (sobretot durant el primer quart del segle XX), fins arribar a la seva formulació definitiva. De què parla aquesta teoria que ha canviat profundament les nostres idees sobre la realitat? Vegem-ho.

La visió que comunament tenim del món que ens envolta és que aquest consta *únicament d'objectes materials* (les ones de radio ho són) *amb propietats concretes* (la posició i la velocitat, per exemple) i completament *separats* els uns dels altres.

El que la física quàntica afirma és que els sistemes quàntics estan desproveïts de propietats objectives. Així, no podem dir que un electró tingui una energia determinada fins que ell es manifesti al nostre món dels sentits. Abans d'aquesta manifestació, ell es troba en un superposició de molts estats energètics dels quals només podem conèixer les probabilitats de la seva manifestació quan l'observem.

A més, els sistemes quàntics que hagin estat en contacte romanen entrellaçats amb influències mútues pràcticament instantànies, més enllà del temps i de la distància que els separi a través d'una unitat que no pot ser explicada a partir de les interaccions conegudes (aquest fenomen és la *no-localitat* quàntica).

Què passa, però, amb els objectes quotidians amb característiques força diferents de les anteriors? Dins de la física quàntica es comprova que els sistemes macroscòpics comuns, que estan formats per un nombre immens de partícules, tenen propietats objectives, malgrat estar integrats per sistemes quàntics que no les posseeixen. És com si les indeterminacions individuals es compensessin per donar lloc a comportaments més previsibles.

Quant a la unitat que hi ha sota la multiplicitat dels sistemes quàntics i que *aparentment* no observem en els objectes que ens envolten, podem fer les consideracions que segueixen:

a) Tots els sistemes quàntics de l'univers varen estar en contacte íntim en el Big Bang i continuen units gràcies a la no-localitat quàntica.

b) Els sistemes macroscòpics contenen en el seu si la no-localitat dels sistemes quàntics microscòpics de què estan formats.

c) Els sistemes macroscòpics són sovint sistemes *caòtics*, que a partir de canvis infinitesimals en alguna de les seves propietats poden donar lloc a canvis amplificats en el seu comportament.

d) Els sistemes macroscòpics *podrien*, en certes circumstàncies, estar sotmesos a canvis apreciables, causats per les influències no locals dels seus components microscòpics i per l'amplificació macroscòpica corresponent deguda a les seves propietats caòtiques.

e) Amb tot l'anterior volem dir que sistemes macroscòpics que haguessin estat en contacte *podrien* influir-se de forma gairebé instantània a través del temps i de l'espai de forma significativa gràcies a *la unitat no local* que estaria present a tot l'univers.

La visió més avançada que ens dóna la física quàntica sobre el nostre món ens transporta a nivells de la realitat que ultrapassen la temporalitat i la nostra manera habitual de pensar, i per parlar-ne ens calen noves paraules, com dèiem en les reflexions entorn de la relativitat general. És el nou llenguatge de la física quàntica el que ens

permetrà aquest eixamplament de la nostra comprensió. Tanmateix, serà fonamental la fe en aquest nou llenguatge i, si no us agrada aquest mot, la seva *acceptació plena* perquè avancem subtilment cap a una visió aprofundida del món, més enllà dels raonaments necessaris que haurem de fer.

En el fons de l'univers hi ha un oceà gairebé infinit d'energia, les ones del qual constitueixen el món material que observem. Aquest fons s'anomena el *buit* perquè està desproveït de moltes de les propietats del "nostre món". Constantment es formen ones des d'aquest oceà, que desapareixen en ell i tornen a sorgir amb una forma diferent. Hi ha ones amb un cert grau d'estabilitat que constitueixen un univers amb totes les seves estructures, com nosaltres mateixos. En aquesta imatge les propietats objectives del nostre món són un miratge i l'aparent estabilitat una il·lusió. La no-localitat manté unit tot l'univers mitjançant aquest buit que l'embolcalla.

Davant de la realitat anterior podríem anar-hi més enllà i donar un salt agosarat pels camins de la reflexió? Sí, ho podem fer. El buit quàntic és la realitat més profunda del món des d'on tot es crea i a on tot retorna. No podria, aleshores, ser ell també la realitat on tot el que esdevingués es conservés? A les *Reflexions entorn a la física del segle XX* es dona aquest salt raonablement agosarat de què parlàvem amb l'afirmació de la conservació dins del buit de tot el que ha esdevingut, esdevé i esdevindrà a l'univers. Tanmateix, *aquesta petjada dins d'aquell oceà no és inamovible, sinó que és transformada contínuament des del món i pot tornar a néixer, renovada, en qualsevol temps i en qualsevol lloc del nostre univers o d'un altre.*

LA FÍSICA DEL SEGLE XX

RELATIVITAT ESPECIAL

LA VELOCITAT DE LA LLUM EN EL BUIT ÉS CONSTANT

Si anem per la carretera a 80 km/h i un cotxe viatja en el nostre mateix sentit a 120 km/h, veurem a través de la nostra finestra que ell ens avança a una velocitat de 40 km/h. Tanmateix, si ens movem a la mateixa velocitat, però en un sentit contrari a la de l'altre cotxe, veurem que ell passa davant nostre a una velocitat de 200 km/h. En el primer cas les velocitats es resten i en el segon se sumen. Això forma part d'una experiència compartida per tots nosaltres.

La llum recorre en un segon uns 300.000 km a través del buit. Què passaria, però, amb un raig de llum que tingués una velocitat de c km/h dins del buit en les dues situacions anteriors? Amb la nostra lògica pensàriem que en el primer cas la llum passaria davant nostre a una velocitat de $c-80$ km/h i que en el segon ho faria a una velocitat de $c+80$ km/h. Doncs bé, la llum sempre ho fa amb la mateixa velocitat c ! Aquest fet costa d'entendre, però és experimentalment cert. Només hi ha un camí per arribar a la seva comprensió: acceptar-lo sense més i a partir d'ell veure cap a on ens condueix aquest resultat tan estrany. Això ens obligarà a canviar moltes de les nostres idees que ens semblaven vertaderes i inamovibles.

LA TEORIA DE LA RELATIVITAT ESPECIAL

A causa que una velocitat es defineix com un quocient entre un espai recorregut i el temps transcorregut per desplaçar-nos-hi, és evident que l'anterior constància de la velocitat de la llum ens portarà a abandonar els nostres conceptes habituals de l'espai i del temps. A partir del fet que la velocitat de la llum en el buit sigui invariant i de la hipòtesi que no hi hagi observadors privilegiats, amb la qual cosa les lleis físiques serien les mateixes per a tots ells, *Albert Einstein* desenvolupà les conseqüències que se'n derivaven. El resultat final fou la seva *teoria de la relativitat especial*. Fixem-nos bé que la invariància de les lleis físiques per a tots els observadors no vol dir que la visió dels fenòmens que contemplen sigui idèntica. Així, si un avió deixa caure una bomba, el pilot veurà que ella està permanentment sota de l'avió i que la seva trajectòria és una línia recta, mentre que una persona des de la Terra observarà que aquella descriu un moviment

parabòlic. Tanmateix, la llei del moviment de la bomba té la mateixa expressió matemàtica per a ambdós observadors.

Les conclusions físiques de la teoria de la relativitat especial són innumbrables. Exposem sintèticament algunes d'elles, que anirem desenvolupant a continuació:

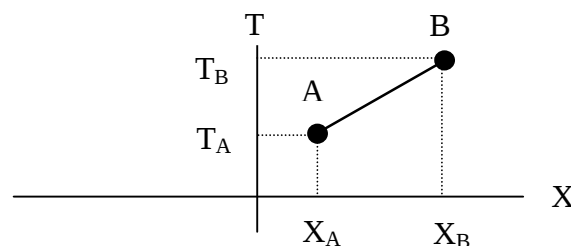
- **No hi ha observadors privilegiats. Les lleis de la física són les mateixes per a tots els observadors.**
- **La velocitat de la llum dins del buit, a més de ser constant per a tots els observadors, no pot ser ultrapassada.**
- **Les distàncies i els temps no són absoluts i depenen dels observadors que facin les mesures. En aquest sentit, esdeveniments que són simultanis per a un observador poden no ser-ho per a un altre i, en certs casos, un mateix esdeveniment pot estar situat en el passat o en el futur d'un altre, segons qui faci l'observació. La relativitat de l'espai i del temps dóna el nom a la teoria.**
- **Hi ha una equivalència entre la massa de la matèria i la seva energia.**

Anem ara a ampliar un xic les idees anteriors.

L'ESPAITEMPS

Tots els esdeveniments ocorren en un lloc i un temps concrets per a un observador determinat. Per a situar un punt a l'espai necessitem tres nombres (dreta-esquerra, davant-darrere, amunt-avall) i per fer-ho en el temps un nombre (les 11 hores, per exemple). Per tant necessitem quatre nombres per identificar un esdeveniment. El conjunt de tots els esdeveniments serà un *espai temps*, doncs, de quatre dimensions, que ens és impossible visualitzar. Estem parlant de l'espai quadridimensional de *Minkowski*.

Si consideréssim només una dimensió espacial tots els moviments es podrien realitzar únicament en un dels dos sentits d'una direcció determinada i l'espai temps, en absència gairebé de gravitació, seria un pla de dues dimensions, una d'espacial i una altra de temporal.

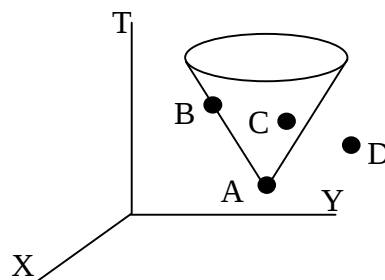


Tenim representat el que acabem de dir en el pla amb eixos X (espacial) i T (temporal) de la figura anterior, on els esdeveniments A i B tenen les coordenades

espacials X_A i X_B , i les coordenades temporals T_A i T_B , respectivament. Entre A i B hem recorregut un espai $s=X_B-X_A$ en un temps $t=T_B-T_A$, a una velocitat $v=s:t$.

Entre dos esdeveniments podem trobar tres situacions ben diferents:

- a) Podem unir-los mitjançant un raig de llum (les partícules que formen la llum són els *fotons*). Estem en aquest cas, si tenim dos punts separats 600.000 km i volem anar-hi en 2 segons viatjant a la velocitat de la llum. Entre aquests dos esdeveniments hi haurà una *separació lluminosa* i els podem unir mitjançant un moviment de la llum físicament possible. Si unim mitjançant raigs de llum un esdeveniment A amb tots els esdeveniments possibles obtenim una figura geomètrica anomenada *con de llum* de vèrtex A, que podem visualitzar en la figura següent, on hem suposat l'existència de dues dimensions espacials (X, Y) i una de temporal (T). Aquí veiem que entre els esdeveniments A i B hi ha una separació lluminosa.



- b) Podem unir-los, si ens movem a una velocitat inferior a la de la llum en el buit. Així, per exemple, podem viatjar en un cotxe sortint de Girona a les 8 hores del matí i arribar a Tarragona a les 10 hores del matí, si viatgem constantment a 100 km/h (la distància entre Girona i Tarragona és d'uns 200 km). Aleshores diem que entre aquests dos esdeveniments hi ha una *separació temporal* i els podem unir mitjançant un moviment físicament possible. Els esdeveniments, com el C, separats temporalment d'un esdeveniment A es troben dins del con de llum de vèrtex A.
- c) Podem unir-los, si ens movem a una velocitat superior a la de la llum en el buit. És el que passa si tenim dos punts separats 300.000 km i volem anar-hi en menys d'1 segon, ja que obligatòriament hauríem de viatjar a una velocitat superior a la de la llum en el buit, la qual cosa és físicament impossible. En aquest cas diem que entre aquests dos esdeveniments hi ha una *separació espacial* i no els podem unir mitjançant un moviment físicament possible. Els esdeveniments, com el D, que estan separats espacialment de l'esdeveniment A es troben a l'exterior del con de llum de vèrtex A.

L'INTERVAL ESPACIOTEMPORAL ÉS CONSTANT

Si il·luminem un arbre i observem la seva ombra, comprovarem que la longitud d'aquesta variarà segons la posició del focus de llum, malgrat que l'alçada de l'arbre sigui constant.

En la teoria de la relativitat tenim una analogia molt semblant. La constància de la velocitat de la llum en el buit fa que entre dos esdeveniments hi hagi una quantitat, anomenada *interval*, que romangui invariant per a tots els observadors. Tanmateix, les seves “ombres” espacials i temporals varien segons els punts de vista dels diferents observadors. *L'espai i el temps no són independents i absoluts*, com podria semblar. Són *interdependents i relatius* dins de la unitat de l'interval, que és l'únic que té una realitat autònoma i absoluta.

RELATIVITAT DE L'ESPAI I DEL TEMPS

Per tal que entre dos esdeveniments es conservi l'interval espaciotemporal, les coordenades espacials i temporals d'un esdeveniment per als diferents observadors s'hauran de transformar d'una forma molt concreta: es tracta de les *transformacions de Lorentz-Poincaré*.

Si tenim dos esdeveniments, un observador podrà mesurar la distància espacial entre ells i el temps que els separa. Com a conseqüència de la constància de l'interval espaciotemporal i de les transformacions de *Lorentz-Poincaré* de què acabem de parlar, aquella distància i aquell temps seran relatius i dependran de cada observador. En aquest sentit, el qualificatiu de teoria de la “relativitat” sembla prou desafortunat i així ho insinuava a voltes el mateix *Einstein*, perquè en ella l'element fonamental és l'interval, que és absolut, i són només l'espai i el temps, que no són altra cosa que “ombres” subsidiàries i “massa humanes” de l'interval, les que esdevenen relatives i, per tant, menys bàsiques.

Vegem ara algunes conseqüències de la relativitat espaciotemporal.

•**Contracció de la longitud.** Situem-nos en una estació ferroviària, on a l'andana una dona observa un tren que es mou davant d'ella. Dins del tren hi ha un viatger que té damunt de la seva taula un objecte. La persona que es troba a l'andana comprova que l'objecte situat sobre la taula té una longitud L_1 en la direcció en què el tren es mou, mentre que el viatger del tren veu que aquella longitud és L_2 . Quina serà la relació entre les longituds respectives, L_1 i L_2 , que ambdós mesuraran sobre l'objecte en la direcció del moviment d'aquest? Seran L_1 i L_2 iguals, com el nostre “sentit comú” ens sembla indicar?

Es comprova que L_1 és més petita que L_2 i, en conseqüència, per a la dona que es troba a l'andana la longitud, L_1 , de l'objecte en la direcció del seu moviment haurà disminuït en relació a la longitud, L_2 , mesurada pel viatger que es mou conjuntament amb l'objecte (*contracció de la longitud*). Podríem pensar que aquest fenomen és degut que el moviment contrau els objectes, però això és fals. El viatger del tren trobarà la mateixa contracció per als objectes que posseeixi la persona de l'andana! Tanmateix, ambdós observadors obtindran les mateixes mesures de les longituds de l'objecte en una direcció perpendicular a la del moviment del tren.

•**Dilatació del temps.** Suposem ara que ens trobem en la mateixa situació anterior. L'observador del tren mesura el temps en què el seu cor realitza un cert nombre de batecs i troba que el seu rellotge que està sobre la taula marca un temps τ entre els dos esdeveniments, corresponents als batecs inicial i final, en què ell *es troba present* (*temps propi*). L'observador de l'andana realitza també la mesura del temps que ha transcorregut entre els dos esdeveniments exteriors anteriors i comprova amb el seu rellotge que ha transcorregut un temps t . Seran τ i t iguals, d'acord amb el nostre "sentit comú" conegut?

Es verifica que t és més gran que τ (*dilatació del temps de vida propi*). Per tant, quan tenim dos observadors que tenen un moviment relatiu entre ells, de tots els temps mesurats entre dos esdeveniments el més petit és el que correspon a l'observador que és *present* en els dos esdeveniments. En particular, es comprova que *el temps propi de la llum és nul i ella viu tots els punts espaciotemporals per on passa en un present etern*.

•**Els diferents temps propis entre dos esdeveniments.** Fins ara, no hem parlat de les característiques dels observadors per no complicar excessivament la nostra exposició i hem suposat implícitament que els observadors eren inercials. Un *observador inercial* o un *sistema d'observació inercial* és aquell en relació al qual els cossos no sotmesos a cap força es mouen amb velocitat constant. Podríem considerar que un observador o un sistema inercial és aquell que, en absència gairebé de gravitació, es mou sense acceleració en relació al fons del cel dels estels fixos. Un observador que es mogui amb velocitat constant en relació a un d'inercial serà també inercial, mentre que un que ho faci amb una velocitat variable no ho serà pas.

Si un observador és no inercial els seus càlculs es compliquen molt, però la representació de l'espai-temps bidimensional en absència pràcticament de gravetat continua essent plana.

Entre dos esdeveniments podem moure'ns de diferents maneres. Així, si sortim de Girona cap a Tarragona i volem arribar-hi dues hores més tard tenim distintes possibilitats: anar sempre a 100 km/h, fer-ho a diferents velocitats al llarg del trajecte, etc. Cada possible manera d'estar present en els dos esdeveniments dóna lloc a una *línia*

d'univers a l'espai i temps quadridimensional i per a cadascuna d'elles l'observador corresponent viurà un temps propi diferent.

En absència de gravitació es demostra que *entre totes les línies d'univers que hi ha entre dos esdeveniments el temps propi més gran correspon a aquella trajectòria rectilínia d'un observador que no està sotmès a cap força i que es mou a velocitat constant en relació a un sistema inercial. Aquest observador seria, doncs, també inercial.*

•**Viatge al futur.** Imaginem una plataforma espacial inercial situada en una zona sense gairebé gravitació i que es mogui entre els esdeveniments A i B. Un observador, O, situat en la plataforma serà inercial i viurà un temps propi, τ , entre aquells esdeveniments. Un altre astronauta, O', surt de la plataforma des de l'esdeveniment A i després de viatjar per l'espai d'aquella zona torna a la plataforma en l'esdeveniment B mitjançant un temps propi viscut, τ' . L'astronauta O' no serà inercial, perquè la seva velocitat haurà variat en relació a la plataforma inercial. Què contemplarà O' quan torni? O' veurà que els habitants de la plataforma espacial hauran envellit en relació a ell, ja que el temps propi inercial, τ , és més gran que el temps propi no inercial, τ' , i haurà viatjat al futur dels habitants de la plataforma.

És també possible viatjar al passat? Es tracta d'una qüestió molt controvertida dins de la comunitat científica, ja que, per exemple, podríem tornar abans del nostre naixement i matar els nostres pares, amb la qual cosa nosaltres no hauríem pogut néixer! Sembla que les partícules quàntiques, potser, serien capaces de viatjar al passat, però no ho podrien fer pas els sistemes macroscòpics, com nosaltres, tret que poguessin existir universos paral·lels, la qual cosa és altament especulativa a hores d'ara. Qui sap el que pot dir-nos el futur!

•**La simultaneïtat no és absoluta.** La relativitat del temps fa que dos esdeveniments que ocorrin en diferents llocs de l'espai i que per a un observador O siguin simultanis no ho siguin pas per a un altre observador O' que es mogui en relació al primer. Aquests dos esdeveniments podrien correspondre al que observa O a París i Londres, per exemple, a les 12 h del matí. Fixem-nos que aquests dos esdeveniments estarien separats espacialment ja que per a unir-los caldria que O observés un moviment entre les dues ciutats en un temps nul que implicaria una velocitat infinita, superior a la de la llum en el buit, la qual cosa no és físicament possible. El fet que "l'ara" de l'univers no sigui absolut i depengui del punt de vista de l'observador ens fa veure que no hi ha una successió de presents única. *Tots els esdeveniments poden ser presents i reals per a algú, malgrat que per a nosaltres pertanyin al passat.*

•**El passat, el futur i la simultaneïtat, entre esdeveniments separats espacialment, no són absoluts.** Si tenim dos esdeveniments, A i B, separats

espacialment, no es podran unir mitjançant una línia d'univers físicament possible ja que caldria viatjar a una velocitat superior a la de la llum. Ens podem trobar en aquestes tres situacions, segons els observadors O, O' i O'':

- * O observa que A i B són simultanis.
- * O' comprova que A està en el passat de B.
- * O'' veu que A està en el futur de B.

Veiem, doncs, que per a esdeveniments separats espacialment la simultaneïtat, el passat i el futur no són absoluts i depenen de cada observador. És el que passaria entre aquells dos esdeveniments que ocorrien a París i Londres a les 12 h del matí per a l'observador O i que abans hem comentat. Per a un altre observador el que esdevé a Londres podria estar en el futur del que passés a París i per a un observador diferent podria ocórrer tot el contrari.

Tanmateix, si els esdeveniments estan separats temporalment, el passat i el futur són absoluts. Així, per exemple, si en Joan ha nascut a Barcelona trenta anys més tard que el seu pare que ho féu a Girona, aquests dos naixements estaran separats temporalment, ja que podríem unir-los mitjançant un moviment que es realitzés a una velocitat inferior a la de la llum, com es fàcil comprovar; en efecte: entre aquells dos esdeveniments hi ha una distància en l'espai de 100 km i una separació en el temps de 30 anys i, si fem la divisió entre els dos valors anteriors, trobarem una velocitat molt inferior als 300.000 km/s de la velocitat de la llum. En aquest cas ningú podrà veure que en Joan neixi abans que el seu pare!

• **Què li ocorre al nostre sentit comú?** Tot l'anterior va en contra del nostre "sentit comú". Com pot ser això possible? Vegem-ho. Amb les *transformacions de Lorentz-Poincaré*, a què hem fet esment abans, es comprova que la relativitat de l'espai i del temps és cada vegada més significativa a mesura que la velocitat de l'observador O en relació a l'observador O' es va apropant a la de la llum. Si la velocitat anterior està molt allunyada de c no hi haurà canvis apreciables entre el que observen O i O'. Això és el que ocorre en la nostra vida de cada dia, en què les velocitats existents són molt petites en relació a la de la llum. És a causa d'aquest fet que ens havíem cregut falsament que els nostres conceptes eren d'aplicació general. Quan comprovem que ens podem trobar en situacions molt diferents de les habituals l'aparent paradoxa es fon.

Podria ocórrer que, si les partícules lluminoses, els *fotons*, tinguessin una energia molt elevada, la constància de la velocitat de la llum en absència de matèria fos violada. Si la predicció anterior fos certa, s'originarien un seguit de canvis inimaginables, a hores d'ara, en la nostra visió del món. Cal esperar les noves observacions que puguin detectar aquest possible fenomen.

LA RELACIÓ ENTRE LA MASSA I L'ENERGIA

La teoria de la relativitat especial té profundes implicacions en el nostre concepte de l'energia. A partir del seu desenvolupament matemàtic i de la invariància de les lleis de la física per a tots els observadors s'arriba a demostrar que l'energia, E , d'un cos està relacionada amb la seva massa, m , de tal manera que es verifica:

- **La massa d'un cos varia amb la seva velocitat.**
- **L'energia i la massa són conceptes directament relacionats a través de l'equació $E = mc^2$. La massa i l'energia són mútuament convertibles.**
- **Es necessitaria una energia infinita perquè un cos de massa en repòs diferent de zero assolís la velocitat de la llum.**

Tota l'energia de l'univers seria insuficient perquè una partícula material tan petita com un electró assolís la velocitat de la llum. Aquesta energia serviria per augmentar la massa de l'electró i la seva velocitat, que s'aniria apropant més i més a la velocitat de la llum, la qual, tanmateix, seria inabastable. La física quàntica faria possible, però, que ell s'unís amb un positró (la seva antipartícula amb la mateixa massa, però amb càrrega elèctrica oposada) i ambdós morissin conjuntament per transformar-se en llum. Només si l'electró renunciés a la seva naturalesa, podria esdevenir llum, assolir la seva velocitat i contemplar tots els temps de la seva vida en un present etern.

CONVERSIÓ ENTRE LA MASSA I L'ENERGIA

• **Energia de fissió.** Quan un àtom molt complex, com l'urani, es trenca en àtoms més senzills la suma de les masses dels productes finals és inferior a la massa inicial. Aquest dèficit de massa i, per tant, d'energia donarà lloc, degut a la conservació de l'energia total, a una energia cinètica i de radiació pròpia de les bombes nuclears de fissió i de les centrals nuclears convencionals, a causa de la transformació de la massa deficitària en energia.

• **Energia de fusió.** Quan diferents àtoms senzills, com el de l'hidrogen, s'uneixen per formar un àtom més complex també apareix finalment un dèficit de massa i d'energia i la transformació energètica corresponent. Es tracta de les reaccions que ocorren en les bombes de fusió i dins dels estels, com el Sol. En un futur podríem tenir centrals elèctriques que obtinguessin la seva energia a partir de la fusió nuclear, en lloc de fer-ho mitjançant la fissió nuclear actual que porta aparellats molts més problemes, quant a les deixalles radioactives que produeixen.

CAMÍ D'UNA NOVA VISIÓ DEL MÓN

Els nostres conceptes tan preuats sobre l'espai i el temps absoluts s'han desfet com un foc d'encenalls i el nostre orgull ha estat greument ferit en veure que el tradicional "sentit comú" no era universal.

Dóna una profunda tristesa contemplar com la modernitat camina a través del món amb unes concepcions, sobre el que és la realitat, enterrades des de fa gairebé un segle. Les classes universitàries i intel·lectuals del nostre temps resten, generalment, amb uns discursos buits quan pontifiquen sobre problemes profunds, mentre ells són esclaus de velles idees.

El món científic, en general, no és gens aliè a la crítica anterior. Altrament, com es pot entendre que els qui accepten els nous paradigmes de la ciència, que més endavant veurem, puguin raonar sobre qüestions religioses a partir de velles premisses i vells conceptes? Per què no ho fan a partir dels símbols i de les conseqüències que aporta la nova visió del món? La raó no pot ser una altra que aquesta: el que està arrelat pregonament dins nostre és més fort que les noves concepcions del món que només ens han penetrat superficialment a flor de pell. Ara més que mai, i sobretot en el món científic, és veritat la sentència de *Werner Heisenberg* quan afirmava que el més difícil no era acceptar conceptes nous, sinó oblidar-ne els vells.

Tot el que hem anat exposant fins ara pot haver-nos trasbalsat. Tanmateix, aquest trasbalsament no és res comparable amb el que vindrà més tard. Encara ens queda molt de camí per fer!

RELATIVITAT GENERAL

EL PRINCIPI D'EQUIVALÈNCIA

El *principi d'equivalència* fou el punt de partida per a la formulació de la *teoria de la relativitat general* per part d'*Albert Einstein*. A continuació, el descriurem des de dos punts de vista diferents, que són físicament anàlegs.

A) Suposem que estem en una zona de l'espai amb absència gairebé de gravitació. Si ara viatgem dins d'una nau amb una acceleració $-g$ en relació al fons d'estels fixos (es tractaria d'un sistema d'observació no inercial) i contemplem dos cossos situats en aquella zona que no estiguin sotmesos a cap força, veurem que ambdós es mouen amb una mateixa acceleració g , oposada a la nostra, *independentment de les seves masses*. És el mateix que observem des de la Terra quan dos objectes propers, sotmesos únicament a l'acció de la gravetat i de massa diferent, cauen amb idèntica acceleració g de la gravetat. Això no ocorre amb els altres camps. Així, dues partícules amb la mateixa càrrega elèctrica i massa diferent estaran sotmeses a una acceleració distinta en presència d'un camp elèctric.

El fet que no sigui possible distingir físicament les dues situacions anteriors constitueix el *principi d'equivalència*. A causa que l'acceleració de la gravetat varia al llarg de la trajectòria d'un cos, el principi d'equivalència serà només aplicable en un cert entorn suficientment petit de l'espai-temps: es tracta del *principi d'equivalència local*.

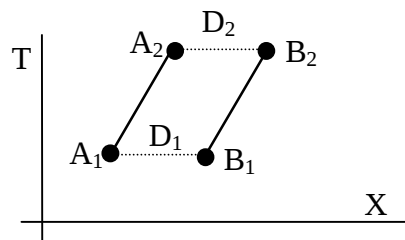
B) Si ara ens situéssim en un sistema d'observació sotmès únicament a l'acció de la gravitació (un ascensor, per exemple, amb el cable de tracció trencat i en caiguda lliure) i durant un temps petit contempléssim objectes propers no sotmesos a cap interacció, a part de la de la gravetat, els veuríem moure's amb velocitat constant. L'observador anterior seria *equivalent* a un d'inercial que veiés moure's amb velocitat constant els cossos no sotmesos a cap força: es tractaria d'un observador *localment inercial*, on no considerariem l'acció gravitacional com una força.

RELATIVITAT GENERAL: CURVATURA DE L'ESPAI-TEMPS

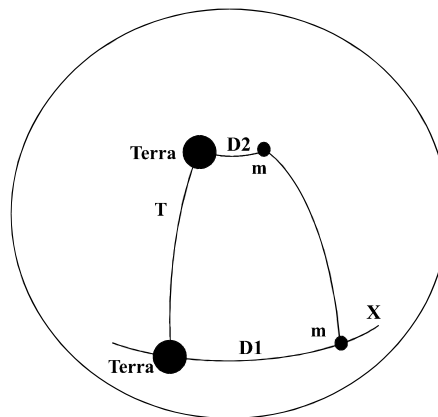
Repetint el que dèiem abans, en absència gairebé de gravitació i amb una única dimensió espacial, l'espai-temps és un pla de dues dimensions, una d'espacial i una de temporal. L'anterior és vàlid tant per a observadors inercials com per a observadors no inercials.

Anàlogament al que ocorre amb la superfície esfèrica de la Terra, que pot ser considerada plana localment per a distàncies petites, es demostra, *a causa que el principi*

d'equivalència és només local, que, si hi ha gravitació, la representació espaciotemporal només serà plana localment: la relativitat general ens condueix a una *curvatura de l'espai temps*, com ocorre amb la Terra que té una curvatura espacial, malgrat ser localment plana.



A la figura superior veiem dos cossos, A i B, representats en un sistema inercial pla, separats al començament una distància D_1 i amb una mateixa velocitat inicial. En absència de forces i de gravitació tots dos seguiran línies d'univers rectilínies. A seguirà la línia d'univers $A_1 \rightarrow A_2$ i B la $B_1 \rightarrow B_2$. Al cap d'un cert temps ells estaran separats una distància $D_2 = D_1$.



A la figura del damunt tenim una “analogia” del que seria la curvatura de l'espai temps causada per la gravitació. A la superfície d'una esfera estan representats els esdeveniments espaciotemporals, amb un eix espacial, X, i un altre de temporal, T. *Les línies equivalents a les rectes de l'espai pla s'anomenen “geodèsiques”*. Aquí les geodèsiques “podrien” ser les circumferències de radi màxim, semblantment als meridians i l'equador de la Terra. Tanmateix, sobre la superfície de la Terra tenim dues coordenades espacials, la latitud i la longitud, mentre que aquí una coordenada és espacial i l'altra temporal (en l'univers físic real tindríem una representació amb tres

coordenades espacials i una altra de temporal que no podem representar gràficament). En absència d'altres forces, a part de la gravitació, les línies d'univers que descriuen els cossos són les geodèsiques. A la figura hi són representades les trajectòries espaciotemporals de la Terra i d'un cos, m . Al llarg del temps les geodèsiques es van apropant i en aquest cas D_2 és més petita que D_1 . Si des de la Terra observem la caiguda d'un cos, interpretarem que el seu moviment és causat per una força que l'atreu. Tanmateix, en *relativitat general* aquest fenomen no és explicat a partir de cap força, sinó com un efecte de la curvatura de l'espai-temps.

Altrament al que ocorre amb l'espai-temps pla, que és invariable, el de la relativitat general és dinàmic i varia d'acord amb la pròpia dinàmica de les masses i energies que el creen. Aquestes són algunes de les conclusions de la relativitat general:

- **Les masses i l'energia corben l'espai-temps, que esdevé dinàmic. Hi ha una relació íntima de les masses i l'energia amb l'espai-temps a través de l'equació gravitacional d'Einstein.**

- **Les masses sotmeses només a l'acció gravitatòria es mouen seguint trajectòries geodèsiques a l'espai-temps.**

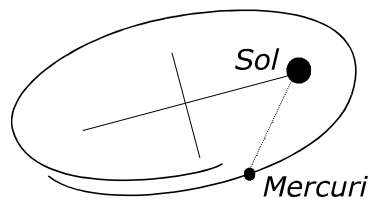
En la relativitat especial la invariància de les lleis de la física es defineix només entre observadors molt *especials*, els observadors inercials en absència de gravitació. Les transformacions de les coordenades espaciotemporals per a aquests sistemes d'observació són també molt *especials*: es tracta de les transformacions de *Lorentz-Poincaré*. Altrament, en relativitat general no hi ha cap mena de limitació per a la invariància de les lleis: els observadors i les transformacions de coordenades corresponents són completament *generals*.

CONSEQÜÈNCIES DE LA RELATIVITAT GENERAL

- **El problema dels bessons i el viatge al futur.** Com ocorria a l'espai-temps pla, on les geodèsiques en absència gairebé de gravitació serien línies rectes, *en un espai-temps amb curvatura el temps propi més gran viscut entre dos esdeveniments concrets correspon al de la línia d'univers geodèsica.*

D'acord amb l'anterior, si tenim dos bessons, un que roman a la Terra i l'altre que se'n va a l'espai i torna, què passarà amb els seus temps propis? El bessó terrestre en el seu moviment conjunt amb la Terra entorn del Sol segueix una geodèsica, mentre que el bessó astronauta no ho fa pas. Quan el bessó astronauta torni a la Terra el seu bessó terrestre serà més vell que ell, i fins i tot podria ja haver mort... o podríem estar a l'any 2500! Aquest efecte de dilatació del temps serà molt més palès si la velocitat de l'astronauta s'apropa a la velocitat de la llum.

•**Precessió de l'òrbita del planeta Mercuri.** L'òrbita del planeta Mercuri no és el·líptica. L'estudi de les geodèsiques a l'espai temps tetradimensional gravitatori creat pel Sol permet explicar el fet que l'òrbita de Mercuri no sigui exactament una el·lipse. La trajectòria quasiel·líptica no és fixa, sinó que va girant entorn del Sol (*precessió*), com es pot veure a la figura que segueix.



•**Curvatura de la llum.** La llum transporta energia i, a causa de l'equivalència entre massa i energia, estarà sotmesa als efectes dels camps gravitatoris. Així, la trajectòria de la llum procedent d'un estel serà desviada quan passi a la vora de Sol i nosaltres el veurem en una direcció diferent a la real (la llum en tenir energia té massa, però no posseeix pas massa en repòs, perquè la velocitat de la llum no pot ser mai zero... és invariant!).

•**Canvi del color de la llum.** Quan la radiació del Sol generada per la fusió nuclear de l'hidrogen viatja des del seu nucli cap a l'exterior, els àtoms de les capes més externes absorbeixen unes freqüències electromagnètiques específiques i distintes per a cada tipus d'àtom. Si des de la Terra analitzem l'espectre solar, observem que per a determinades freqüències la intensitat és més petita, degut a aquella absorció. Aquestes freqüències identifiquen els diferents àtoms, però, les que nosaltres mesurem són menors que aquelles que els correspondria. Aquest desplaçament cap al color vermell (la freqüència de la llum corresponent al color vermell és més petita que la del color violet) està totalment d'acord amb les previsions de la relativitat general.

•**La gravitació alenteix el temps.** Malgrat que no és immediat veure-ho, el fenomen anterior implica que el temps propi transcorre més lentament en presència de camps gravitacionals més intensos. Segons això, si dues persones se separen, una caminant al llarg d'una vall i l'altra per damunt de les muntanyes, quan es tornin a trobar la segona haurà envellit en relació a la primera, perquè el seu trajecte haurà transcorregut per zones amb un camp gravitatori més petit. L'efecte esmentat seria negligible, però podria ser significatiu amb camps gravitacionals intensos, com els que tenim vora d'estels massius o d'un forat negre.

•**Col·lapse d'un estel: forat negre.** Sabem que dins dels estels les reaccions nuclears de fusió produeixen l'energia que emeten per radiació i que impedeixen el col·lapse gravitacional. Quan s'esgoti el material que es pot fusionar l'atracció

gravitatòria ja no tindrà aturador i el col·lapse serà inevitable. El que esdevindrà a continuació dependrà de la massa inicial de l'estel i de la seva massa residual després dels processos que puguin tenir lloc

Si la massa inicial de l'estel és suficient, es produirà una explosió de *supernova*, a partir de la qual es crearan i s'escamparan elements químics nous que podrien concentrar-se més tard i donar lloc a altres estrelles, planetes o a la vida mateixa: nosaltres som fills de la pols sorgida de la mort de les estrelles.

Quan un estel mor (amb explosió de supernova o sense ella), si la seva massa residual supera un cert llindar, es produeix un *forat negre*. Un forat negre és un objecte físic limitat per una superfície anomenada *horitzó*. Tot el que s'endinsa en un forat negre més enllà de l'horitzó no pot escapar (ni la mateixa llum ho pot fer i per això aquell ens sembla negre). Les càrregues elèctriques que s'aproximen a l'horitzó, des de l'exterior del forat negre, són fortament accelerades i radien ones electromagnètiques molt potents. *Aquestes radiacions i els efectes gravitacionals dels forats negres ens permeten detectar-los*. Es creu que al centre de la Via Làctia, la nostra galàxia, hi ha un enorme forat negre que contínuament s'empassa matèria i emet radiacions molt energètiques.

Degut a l'alentiment del temps a la vora dels camps gravitatoris intensos, un astronauta vora de l'horitzó d'un forat negre experimentaria el seu viatge com un instant, mentre que un observador llunyà viuria el trànsit amb un temps que tendiria a infinit i, de fet, deixaria de rebre informació de l'astronauta quan s'apropés a l'horitzó.

•**Les ones gravitacionals.** A causa que l'espai-temps és dinàmic, ell variarà d'acord amb els moviments de les masses que contingui. Quan aquests siguin importants, com en el col·lapse d'un estel o en les fusions galàctiques, poden aparèixer canvis energètics significatius. La possible disminució local de l'energia es compensaria amb la radiació d'*ones gravitatòries* que donarien lloc a variacions de les propietats i l'estructura de l'espai-temps, i de les *dimensions* dels cossos que es trobessin en el seu pas.

Els estels formats per neutrons (els neutrons són partícules que conjuntament amb els protons formen part de nucli atòmic) són molt compactes i tenen una gran velocitat de rotació pròpia. Els *estels de neutrons* creen un fort camp magnètic en una direcció no coincident amb la de l'eix de rotació de l'estel, per raons no del tot conegudes a hores d'ara. Les partícules de l'entorn seran fortament accelerades per l'intens camp gravitatori de l'estel. Si elles tenen càrrega elèctrica, les seves trajectòries i la direcció de les radiacions electromagnètiques que emetran estaran condicionades pel camp magnètic rotatori. Només observarem aquestes radiacions quan el camp magnètic de l'estel tingui una orientació determinada en relació a nosaltres. El que veurem en realitat són impulsos electromagnètics separats per un període de temps que dependrà de la velocitat de rotació de l'estel, semblantment al que faria un far marítim: es tracta d'un *púlsar*.

Si tenim un sistema binari format per un estel acompanyat d'un púlsar, aquest serà un *púlsar binari* i els dos estels tindran moviments de rotació entorn del seu centre de gravetat. Si l'evolució del conjunt origina ones gravitatòries, l'energia del sistema binari disminuirà i la velocitat de rotació total del púlsar (la obtinguda a partir de la velocitat de rotació pròpia i de la que té entorn de l'altre estel) es modificarà. La detecció *indirecta* de les ones gravitatòries ha estat possible a partir del canvi del període de les radiacions d'un púlsar binari a causa de la variació de la seva velocitat de rotació total.

La detecció *directa* de les ones gravitacionals no s'ha obtingut a hores d'ara i podria fer-se palesa per les variacions de les dimensions dels cossos que les interceptessin, degut al canvi de l'estructura de l'espai-temps que elles originarien.

• **Expansió de l'univers: Big Bang.** Un univers que es vegi igual des de qualsevol punt s'anomena *homogeni* i si des de qualsevol punt es veu igual en totes les direccions s'anomena *isòtrop*. És evident que a petita escala l'univers no és ni homogeni ni isòtrop. Tanmateix, a grans escales es comprova que té molt aproximadament les propietats d'homogeneïtat i isotropia.

Quan estudiem l'univers amb la relativitat general i, a més, afegim les propietats d'homogeneïtat i isotropia (*models de Robertson-Walker*), trobem que el nostre univers està en expansió, d'acord amb les dades experimentals.

En l'expansió de l'univers no hi ha centres privilegiats. Podem imaginar l'anterior com si la geometria de l'espai de l'univers fos la de la superfície bidimensional d'un globus. Si en aquest globus dibuixem punts i l'anem inflant, cada punt serà el centre de l'expansió i des d'ell es veurà com els altres punts es van allunyant a una velocitat que creix amb la distància en què es troben. És el mateix que comprovà *Edwin Hubble* en les seves observacions entorn de la velocitat de *recessió* amb què les galàxies s'allunyaven de la Terra. En la analogia anterior no existiria l'espai interior o exterior de la superfície esfèrica: *en relativitat general fora de l'univers espaciotemporal no hi ha res!* Altrament, quan l'estudiem amb l'ajut de la física quàntica ell podria pertànyer a una regió *real* més àmplia i que estaria desproveïda de molts dels atributs del nostre món.

Si ara reculéssim en el temps, tota la matèria s'aniria apropant fins arribar a un punt on *ella estaria concentrada i en contacte íntim amb una densitat infinita*. Es tractaria de la *singularitat* a l'origen de l'univers on la teoria de la relativitat general no es pot aplicar i on tots els nostres conceptes habituals fracassen. Després del *temps de Planck* (uns 10^{-43} s des del principi de l'univers) sorgí la Gran Explosió o *Big Bang* i amb ella el nostre univers espaciotemporal. El que ocorregué “abans” del temps de Planck, *amb singularitat o sense*, és desconegut a hores d'ara, encara que és altament probable que en aquest domini desapareguin les propietats temporals del nostre univers.

Dues preguntes apareixen immediatament:

a) Què hi havia abans del Big Bang?

b) On va ocórrer la singularitat?

Ambdues qüestions tenen una mateixa resposta. En la *relativitat general*, a través de l'*equació gravitacional d'Einstein*, la massa-energia i l'espai-temps estan íntimament relacionats, com dèiem. *Amb l'aparició de la massa-energia varen aparèixer també l'espai i el temps a partir d'un origen més enllà d'ambdós. No hi havia "abans" ni temps ni espai, ells varen ser creats conjuntament amb la matèria i l'energia!*

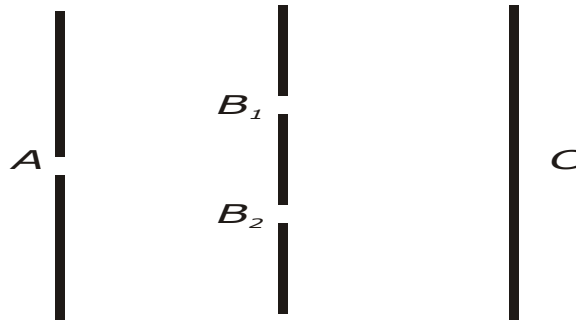
LA FÍSICA CLÀSSICA I LA NOVA VISIÓ DEL MÓN

Les revolucionàries teories de la relativitat especial i general han esfondrat part de l'edifici conceptual que l'home havia anat construint al llarg de la seva història. Es tracta, però, d'una revolució intel·lectual "pacífica", sense vessament de sang. *La visió clàssica d'Isaac Newton* roman essencialment correcta mentre no s'assoleixin velocitats elevades o camps gravitatoris intensos. Només en unes condicions extremes caldrà abandonar els vells paradigmes i substituir-los pels de la relativitat especial i general. Hem anat més enllà de les idees del passat, però sense destruir-les despietadament. Són correctes dins del seu àmbit propi, però fora d'aquest són fonamentalment insuficients i cal substituir-les per noves visions.

Dins de la relativitat conservem encara conceptes molt preuats, com velocitat, determinisme, la conservació de l'energia, etc, conceptes tots ells que pertanyen a la *física clàssica* convencional, on les magnituds varien de forma contínua. Tanmateix, al principi de l'univers els nostres paradigmes s'esfondren i ens caldrà una nova teoria. La *física quàntica*, que exposarem a continuació, és més revolucionària i menys conservadora. La seva revolució continuarà essent pacífica, com sempre ho ha estat la ciència autèntica. Tanmateix, ens donarà uns ulls nous per anar a racons del món intuïts en el passat i que romanen ocults als nostres ulls materials.

LA FÍSICA QUÀNTICA

L'EXPERIMENT DE LES DUES ESCLETXES



Aquest experiment fonamental, esquematitzat a la figura precedent, ens abocarà a l'estrany món de la *física quàntica*, d'acord amb el que segueix.

Un feix d'electrons provinents de A "passa a través de les escletxes B_1 i B_2 " i incideix en C. A continuació podem realitzar aquestes experiències:

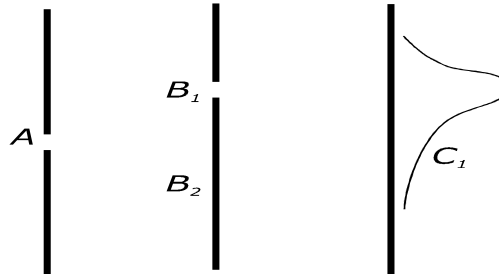
1-Tapem l'escletxa B_2 i obrim la B_1 : els electrons incideixen en C amb una distribució C_1 .

2-Tapem l'escletxa B_1 i obrim la B_2 : els electrons incideixen en C amb una distribució C_2 .

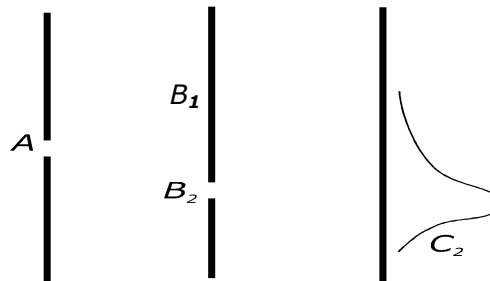
3-Obrim les dues escletxes: els electrons incideixen en C amb una distribució D que no coincideix amb $C_1 + C_2$. Aquesta distribució sembla indicar-nos que els electrons estan sotmesos a les interferències pròpies de les ones.

Les tres figures, que podem veure a continuació, ens permeten visualitzar el que hem dit. *Tinguem en compte que tot l'anterior s'observa encara que els electrons s'emetin des de A amb prou separació entre ells*, de forma que no s'interfereixin mútuament. En conseqüència, semblaria que cada electró interferís amb ell mateix, la qual cosa ultrapassa tot el que la nostra imaginació pot concebre, perquè com pot una partícula material desdoblar-se en les dues escletxes per produir aquell efecte?

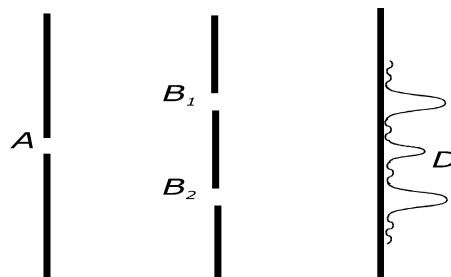
1-Tapem l'escletxa B_2 :



2-Tapem l'escletxa B_1 :



3-Obrim les dues escletxes:



El resultat és sorprenent davant del raonament següent:

- Cada electró passa per B_1 o B_2 alternativament.
- Si l'electró passa per B_1 , tenim la distribució C_1 .
- Si l'electró passa per B_2 , tenim la distribució C_2 .
- Per tant, la distribució final serà $D=C_1+C_2$.

Si a), b) i c) són certes, hom dedueix d). Sabem, però, que d) és falsa i, per tant, a), b) o c) són falses. Com que b) i c) són experimentalment certes, hom conclou que l'expressió a) és falsa.

Naturalment, per obtenir aquest resultat hem emprat la lògica convencional. La conclusió, però, és paradoxal. En tota paradoxa hi ha implícita una fal·làcia, quelcom que se'ns escapa al nostre raonament.

Obtindríem una possible solució a aquest dilema renunciant a la lògica clàssica. La conclusió final seria la correcta i no caldria variar cap premissa. Hi ha, però, un altre camí més adient que sense abandonar aquella lògica ens força a *canviar els nostres conceptes*.

EL MICROCOSMOS NO ÉS EL QUE PENSÀVEM

Les manifestacions corpusculars i ondulatòries al microcosmos. Hi ha vegades que entitats físiques, com els electrons i els fotons, es manifesten com si fossin petits objectes materials que comuniquessin la seva energia a altres amb els quals es trobessin. Diem aleshores que ells es comporten com a corpuscles o partícules o que tenen propietats corpusculars.

Tanmateix, a l'experiment de les dues escletxes es produeixen figures d'interferència pròpies de les ones. En aquest sentit afirmem que els electrons es comporten com a ones o que tenen propietats ondulatòries. El mateix podem afirmar sobre la llum, el comportament ondulatori de la qual és conegut des de fa segles.

Tornem a topar amb el nostre “sentit comú”. Semblaria, doncs, que arribem a una contradicció, ja que un corpuscle té una extensió espacial limitada, mentre que això no ocorre quan la llum o els electrons passen simultàniament a través de dues escletxes i apareixen figures d'interferència, pròpies de les ones, sobre una pantalla posterior. En una cèl·lula fotoelèctrica que controla una alarma la llum té una manifestació corpuscular, mentre que en les interferències la té ondulatòria i això és contradictori per al nostre “sentit comú”. En definitiva: què és la llum o un electró, un corpuscle o una ona?

LA FÍSICA QUÀNTICA

La contradicció, del que acabem de dir, amb el nostre “sentit comú” és molt més gran que la que apareix en la relativitat. En aquesta només topem amb els nostres conceptes habituals de l'espai i del temps i, si els canviem, tot es reconduïx quan adoptem una nova forma de pensar. En la dualitat ona-corpuscle (o, si voleu, ona-partícula) semblaria que topem amb la nostra lògica en comprovar que simultàniament

podria haver-hi propietats contradictòries, com les d'ona i de corpuscle, la qual cosa és infinitament més greu. Com solucionar aquest enigma? Si no volem canviar la nostra lògica, és possible que hàgim de canviar alguns conceptes que apareixen en el nostre raonament anterior i que ens porten a una contradicció. Això ens conduirà a la formulació de la *física quàntica*.

La solució de l'enigma consisteix a veure que l'afirmació que un electró té propietats objectives, com les de ser una partícula o una ona, no és d'aplicació general. En la nostra experiència ens hem acostumat a dir coses com aquestes: aquest cotxe té una velocitat de 70 km/h, ara jo estic a Barcelona, la gespa és verda, etc. L'home ha anat evolucionant a base d'adquirir conceptes que s'adapten al seu entorn i l'ajuden a viure, i aquests conceptes són vàlids en aquestes circumstàncies. Seria una gran ingenuïtat creure que aquests conceptes també es poguessin emprar en totes les situacions. Els nostres conceptes no han sorgit a partir de l'observació d'electrons o fotons i no tenen perquè ser universalment aplicables. La formulació quàntica parteix del fet que no podem assignar, en general, propietats objectives a les coses, per què ho hauríem de fer?

Vegem ara com podem destruir la fal·làcia a què fèiem esment en explicar l'experiment de les dues esclatxes.

Acceptar la premissa a) del raonament d'abans implica acceptar l'assignació a l'electró de propietats objectives, en aquest cas les de passar per una esclatxa concreta i única, *prescindint del fet que ell no es manifesti físicament durant aquest pas*.

En lloc de l'anterior, diem que l'estat de l'electró és *una mescla coherent* de diferents possibilitats i únicament quan l'electró es *manifesti* de determinada manera, podrem fer afirmacions concretes.

Quan obrim les dues esclatxes, l'electró no es manifesta passant per una esclatxa única, no podem utilitzar el connectiu "o" per dir que l'electró passa per una esclatxa o l'altra i, per tant, la paradoxa es fon.

Si modifiquem l'experiment anterior amb la col·locació de detectors davant de cada esclatxa, *forcem la manifestació* i tenim una distribució $D=C_1+C_2$. Això ens indica que quan l'electró es *manifesta*, ell *pot canviar*.

Semblaria, doncs, que l'electró (i el fotó, neutró...) es trobés en un *ESTAT* que es pogués manifestar de maneres molt diferents amb probabilitats concretes i que ell estigués privat de les propietats objectives que nosaltres assignem als objectes del nostre món.

El *principi de complementarietat de Bohr* ens expressa aclaridorament la *contradicció aparent* deguda a la impossibilitat de manifestacions corpusculars i ondulatòries simultàniament: els sistemes quàntics no són ni partícules ni ones. És *la unió entre el sistema i el seu entorn* la que provoca la manifestació corpuscular o

ondulatòria. Ambdues no representen propietats objectives del sistema quàntic corresponents al "nostre món de cada dia", sinó propietats manifestades de la totalitat del sistema i el seu entorn.

És amb l'observació acurada dels fenòmens i amb l'assumpció que el seu absurd aparent apareix només a causa dels nostres hàbits que podrem crear nous conceptes que ens transmetin una comprensió més subtil del món.

Els principis quàntics, altrament al que passa amb la relativitat general, no poden ser deduïts per un raonament lògic fet pas a pas. Ens són donats. Segons *Richard Feynman*, ningú entén el que la física quàntica significa realment: cal acceptar-la. I *Niels Bohr* afegeix que si algú no s'escandalitza pels principis i les conclusions de la física quàntica és que no l'ha entès realment.

Per resumir un xic tot l'anterior, podem reflexionar així:

- Els sistemes quàntics formen part de la nostra realitat, però no es comporten com els objectes quotidians que coneixem.

- Tot sistema quàntic es troba en un *ESTAT* que ens és inabastable. Només en l'acte de la manifestació podem "conèixer-lo" lleugerament.

- L'*ESTAT* del sistema fixa les probabilitats de les diferents manifestacions possibles a partir del seu pla d'existència.

- Quan el sistema es manifesta el seu *ESTAT* canvia *generalment*.

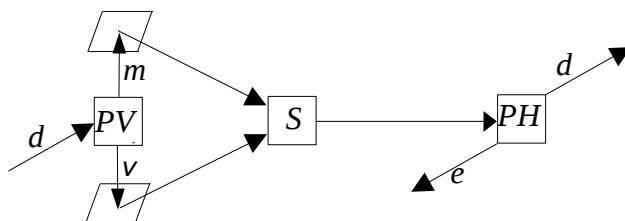
- És, per altra banda, intuïtiu que l'*ESTAT* d'un sistema evolucioni degut a la dinàmica general, tot variant el seu mode concret de manifestar-se. *Erwin Schrödinger*, amb la seva equació d'ona, permeté per primera vegada l'estudi de l'evolució d'un estat quàntic. Més endavant, *Paul Dirac* generalitzà aquesta equació unint la física quàntica amb la relativitat especial.

- Generalment, no podem assignar als sistemes quàntics propietats objectives, que només es materialitzen en l'acte de la manifestació.

L'experiment de les dues esclatxes ens aboca plenament dins de les paradoxes dels sistemes quàntics. En realitat, d'una manera o d'una altra acabem sempre aterrant en ell quan hem de parlar de l'estranyesa quàntica: és el que passa amb l'experiència que exposem a continuació, equivalent lògicament a l'anterior, i que resulta tan o més sorprenent.

Una partícula pot tenir una propietat interna anomenada *espín*, que comentarem més endavant. Quan un conjunt d'electrons amb l'espín horitzontal, cap a la dreta (*d*) o cap a l'esquerra (*e*), entra dins d'un polaritzador vertical (*PV*) el 50% d'ells surt amb l'espín cap amunt (*m*) i un altre 50% amb l'espín cap avall (*v*). Tenim resultats anàlegs intercanviant tots els papers horitzontal/vertical.

A la figura que segueix podem visualitzar l'experiment que realitzarem.



Un grup d'electrons amb espín horitzontal d entra al polaritzador vertical PV . Els electrons amb espins m i v se separen, passen després pel sistema S i més tard ho fan per un polaritzador horitzontal PH . Realitzem aquestes experiències:

1-No deixem que els electrons m passin a través de S . A la sortida de PH hi ha un 50% d'electrons e i un 50% d'electrons d .

2-No es deixa que els electrons v passin a través de S . A la sortida de PH hi ha també un 50% d'electrons e i un 50% d'electrons d .

3-Es deixa que els electrons m i v passin a través de S . Hi haurà a la sortida de PH un 50% d'electrons e i un 50% d'electrons d , com semblaria "lògic"? No! El 100% dels electrons a la sortida de PH són d ! Això ocorre, perquè quan un electró surti de S l'estat inicial del sistema quàntic no haurà variat, ja que abans no s'ha manifestat en cap sentit, i, en conseqüència, continuarà essent d .

ALGUNES CONCLUSIONS DE LA FÍSICA QUÀNTICA

El qualificatiu de "*física quàntica*" prové del fet que a la teoria corresponent moltes variables no assoleixen valors continus, sinó discontinus o quàntics. Això ocorre, per exemple, amb la càrrega elèctrica que és sempre un múltiple enter de la càrrega de l'electró i que, per tant, no varia de forma contínua. El nom de *mecànica quàntica*, amb què generalment es coneix aquesta teoria, ens sembla que és totalment inadequat, perquè en cap cas es tracta d'una mecànica, sinó de quelcom molt més profund. Tot plegat és una conseqüència de les primeres passes insegures de la fonamentació de la teoria.

Podem afirmar que el formulisme matemàtic de la física quàntica amb les *prediccions experimentals* corresponents és acceptat per la totalitat de la comunitat científica. Les discrepàncies apareixen quan es vol interpretar el que l'anterior formulisme significa realment. La divergència fonamental rau en afirmar o no que la descripció dels sistemes físics que fa la mecànica quàntica sigui completa. Segons *Albert Einstein*, la física quàntica era incompleta i no descrivia tota la realitat dels sistemes quàntics, mentre que la *concepció de Copenhagen* de *Niels Bohr* afirmava que tot el que es podia dir sobre la realitat era el que estava contingut en la teoria quàntica i que no s'havia d'esbrinar el que pogués haver-hi més enllà dels fenòmens observats. Per a

Einstein una condició suficient, encara que no necessària, per parlar de realitat era admetre l'existència de les propietats objectives, que ell anomenava *element de realitat*. L'absència d'aquest element de realitat no negava, però, el realisme filosòfic que defensa l'existència de la realitat, més enllà de les representacions que poguem tenir sobre ella.

Actualment, hi ha cada vegada més veus afirmant que semblaria que *la realitat física* de l'univers estigués formada per dos nivells: l'un seria el món dels fenòmens observables i l'altre el món sub quàntic ocult que estaria a la base del nostre món conegut i l'explicaria. L'esperit positivista de l'època en què hi hagué el debat entre *Einstein* i *Bohr* féu que finalment sortís guanyadora la concepció de *Bohr*. Malgrat tot, en paraules de *Paul Dirac*, "la física quàntica no ha trobat encara la seva expressió definitiva i està necessitada de canvis profunds... És summament probable que a la llarga la raó estigui del costat d'*Einstein*".

Prescindint del debat ans esmentat, podem explicitar la fenomenologia del món observable a partir d'una sèrie de conclusions:

•**La no-objectivitat i l'indeterminisme quàntics.** Els sistemes quàntics s'expressen matemàticament com una superposició de les distintes manifestacions possibles. Quan ells "fan acte de presència" ho fan en una de les manifestacions contingudes en el seu estat: es tracta del *col·lapse quàntic*. Només podem conèixer les probabilitats que cada manifestació sigui real. Hi ha un indeterminisme essencial, que no té res a veure amb el procés estadístic que ens permet saber, per exemple, la probabilitat que una carta amagada sigui un rei.

En general, els sistemes quàntics no tenen les propietats objectives del nostre món habitual (l'*element de realitat* d'*Einstein*), però quan es manifesten ho poden fer a través de realitats conegudes del "nostre món", encara que sovint limitades. Així, d'acord amb el *principi d'incertesa de Heisenberg*, no podem observar exactament la posició i la velocitat d'un electró simultàniament: si coneixem la seva velocitat amb precisió, la seva posició quedarà totalment indeterminada i se'l podrà trobar, quan col·lapsi, en qualsevol punt de l'espai! En conseqüència les partícules quàntiques no tenen trajectòries físiques.

En la nostra experiència diària podem visualitzar dos cotxes idèntics que inicialment estiguin en dos llocs allunyats i, a través de les seves diferents trajectòries, podem distingir-los perfectament al llarg del temps. Tanmateix, no podem fer aquesta distinció entre partícules quàntiques idèntiques, com dos electrons, a causa de l'absència de trajectòries en els objectes microscòpics. Si observem després d'un temps un dels electrons anteriors, no podrem saber quin dels dos és en realitat! Aleshores, diem que les partícules quàntiques idèntiques són *indistingibles* entre elles. Aquest fenomen ens permet l'estudi de les propietats de sistemes físics formats per un nombre considerable de partícules idèntiques, amb una conformitat plena amb els resultats experimentals.

La superposició quàntica de les diferents manifestacions possibles té una aplicació important en la *computació quàntica*. Els ordinadors quàntics del futur augmentaran de forma decisiva la potència dels actuals ordinadors, a partir dels múltiples càlculs en paral·lel que es podran realitzar alhora, a causa de l'esmentada superposició quàntica. Diguem-ho d'una forma més entenedora: podrem fer *simultàniament* els càlculs corresponents a totes les possibilitats de manifestació que un sistema quàntic té dins d'ell. Malgrat que els ordinadors convencionals es fonamenten en les propietats quàntiques dels seus components, ells no utilitzen la superposició quàntica per fer els seus càlculs a partir de les diferents situacions possibles. Aquells s'han de portar a terme *l'un després de l'altre*, la qual cosa augmenta significativament el temps del procés de la computació convencional en relació al de la computació quàntica.

•**Recuperació del nostre món conegut.** La *física quàntica* és aplicable a qualsevol sistema físic, microscòpic o no. Quan realitzem l'estudi quàntic dels sistemes macroscòpics que ens envolten, l'indeterminisme i la superposició quàntica desapareixen *normalment* i recuperem les propietats dels objectes coneguts a través de la nostra experiència habitual i el nostre sentit comú. A l'experiment de les dues esclatxes, si, en lloc d'electrons, llancem pilotes de tennis, cada pilota que incideixi a la pantalla haurà passat per un orifici o l'altre, però no per tots dos "alhora". També podrem conèixer simultàniament la posició i la velocitat d'un cotxe, tot burlant *el principi d'incertesa de Heisenberg*.

•**Els sistemes caòtics.** Tanmateix, hi ha sistemes físics macroscòpics que hereten l'indeterminisme quàntic, gràcies als continus col·lapses dels subsistemes microscòpics de què estan formats. Es tracta dels sistemes caòtics que, davant dels col·lapses infinitesimals ans esmentats, poden tenir, gràcies a la propietat de *no-linealitat* de les seves equacions dinàmiques, evolucions completament diferents i impredecibles. És el que ocorre amb els canvis del temps i, probablement, amb l'evolució de la vida sobre la Terra. Així, l'estat de l'atmosfera és tan extraordinàriament sensible a canvis insignificants de les seves condicions que molt sovint no podem fer-ne les prediccions acurades que caldria. En termes més populars, tot l'anterior es manifestaria en *l'efecte papallona*: el simple aleteig d'una papallona podria canviar el destí de l'univers!

•**La no-localitat quàntica.** Quan la física quàntica s'aplica a sistemes compostos per altres de més senzills que abans hagin estat en contacte, es troba que aquests romanen units d'una forma molt íntima. Si tenim, per exemple, dues partícules que hagin interaccionat i s'hagin allunyat suficientment l'una de l'altra, comprovem teòricament i experimental que quan una d'elles es manifesta d'una forma concreta a través del col·lapse del seu estat, l'altra reacciona gairebé de forma instantània, *com si fos* informada a una velocitat superior a la de la llum, i col·lapsa amb una manifestació que

té una correlació molt estricta amb l'anterior. A partir de les conclusions de l'*experiment EPR* i del *teorema de Bell*, que veurem més endavant, es demostra que hi ha una *connexió informativa no local* entre aquells esdeveniments *separats espacialment* i que, per tant, no podria tenir efecte a través de la propagació *material* dins de l'espai-temps que *és sempre local*, d'acord amb la teoria de la relativitat. Diem, aleshores, que les partícules anteriors estan *entrellaçades*. El descobriment físic de la unitat no local quàntica és una de les fites més transcendents del segle XX.

La no-localitat quàntica es pot utilitzar per transmetre informació privada sense la propagació real d'aquesta, amb l'ajuda d'una altra transmissió convencional clàssica pública. Suposem dues persones, *A* i *B*, que reben cadascuna de les partícules, p_A i p_B , entrellaçades. Una altra partícula, p_C , conté informació quàntica, coneguda o no per *A* i que aquest vol comunicar a *B*. *Es demostra* que, si *A* fa col·lapsar el conjunt p_A-p_C , col·lapsa el sistema $p_A-p_B-p_C$ i varia l'estat de p_B de tal manera que amb la informació, q , referent al nou estat conjunt p_A-p_C , que *A* envia per transmissió clàssica a *B*, aquest podrà saber la transformació que cal aplicar a p_B per trobar p_C .

B coneixerà un missatge sense ésser transmès realment, mentre que la informació q preserva el seu caràcter confidencial, perquè només pot ésser descodificada per *B*, posseïdor de p_B .

La transmissió d'informació no vulnera el principi de la relativitat, perquè *B* només estarà en possessió d'ella després de rebre la informació clàssica q , que no pot viatjar més ràpidament que la llum. La variació "instantània" de l'estat de p_B és deguda a la no-localitat quàntica pròpia dels estats entrellaçats, amb els quals cada vegada haurem de conviure amb més naturalitat.

El teletransport quàntic ens aboca a la ciència-ficció. Podríem, *potser*, entrellaçar dos sistemes macroscòpics, s_A i s_B , situats en dos llocs molt allunyats, *A* i *B*. La interacció posterior del sistema s_A amb el sistema s_C seguida de la telecomunicació d'informació convencional adient des de *A* a *B*, permetria la materialització del sistema s_C a expenses del s_B . Això és molt diferent de la desmaterialització de s_C teletransportada a *B* que faria desaparèixer s_C d'un lloc i aparèixer en un altre. El que en realitat ocurriria, doncs, seria l'aparició de s_C en *B*, *gràcies a la transformació de s_B* , tot romanent les seves "deixalles" en *A*.

• **Les partícules i les interaccions.** Dins del món subatòmic apareixen una munió de partícules diferents i d'interaccions entre elles. Què podem fer amb tants tipus d'interaccions i de partícules? No podria haver-hi una *unificació* que simplifiqués aquestes multiplicitats? El camí per fer-ho és el de la simetria.

Si tenim un quadrat, per exemple, hi ha *transformacions*, com les rotacions de 90° o de 180° a partir del seu centre, que ens permeten visualitzar-lo en el seu conjunt de forma

idèntica. Diem, aleshores, que el quadrat té un conjunt de *simetries* que el deixen invariant davant d'aquelles transformacions.

D'una manera anàloga la física busca aquelles simetries que deixin invariants les expressions quàntiques que defineixen les partícules i les interaccions. Aquestes simetries són, en general, molt abstractes i ens permeten trobar una *unificació* entre la diversitat que se'ns presenta, unificació que fins ara ha estat només parcial. Tot això ens condueix al *model estàndard* de les partícules i de les interaccions acceptat actualment.

Una conseqüència de les simetries de les lleis físiques, en general, tant en la física clàssica com en la física quàntica, és l'aparició de diferents magnituds que, com l'energia, es conserven al llarg de l'evolució. Es tracta de les *lleis conservatives*.

Les interaccions *gravitatòria* i *electromagnètica* són de llarg abast i per aquesta raó varen ser les primeres en ser conegudes per l'home. A més d'aquestes trobem actualment les interaccions *feble* i *forta*. La interacció feble apareix en les reaccions de radioactivitat, com les que ocorren dins del Sol. La interacció forta és la responsable de la força nuclear que manté units els components del nucli atòmic (neutrons i protons).

El camí més comunament acceptat per a l'estudi de les interaccions ho constitueix una extensió de l'*equació de Dirac* que condueix a la *teoria quàntica de camps*, on aquelles apareixen a partir d'uns principis molt generals de simetria davant d'unes transformacions matemàtiques tipus *galga* o "*gauge*", amb noms tan estranys com $U(1)$, $SU(2)$ i $SU(3)$. L'esmentada teoria és fruit de la *unió de la relativitat especial i de la física quàntica*, un dels èxits més espectaculars de la física moderna. Gràcies a les simetries "*gauge*" ens apareixen les interaccions i les partícules responsables de la seva transmissió.

La teoria de la relativitat general ha estat plenament reeixida en l'estudi de la gravitació en condicions no gaire extremes. Tanmateix, a hores d'ara la interacció gravitatòria no ha pogut ésser estudiada plenament a través de la física quàntica.

A continuació indiquem les interaccions conegudes (entre parèntesis hi ha les partícules responsables de la transmissió de la "força"):

- *Interacció *gravitatòria* (els hipotètics *gravitons*).

- *Interacció *feble* (W^+ , W^- i Z).

- *Interacció *electromagnètica* (fotons).

- *Interacció *forta* (gluons).

Hem ordenat aquestes interaccions segons la seva intensitat (la interacció més dèbil és la gravitatòria i la més potent la forta). Les interaccions feble i electromagnètica han estat unificades en la *interacció electrofeble*, on ambdues apareixen com manifestacions d'una única interacció més àmplia.

Les partícules tenen una propietat, anomenada *espín*, que permet classificar-les en dos grups: *fermions* i *bosons*. El valor de l'espín dels bosons és enter i el dels fermions és semienter. Totes les partícules transmissores de la “força” interactiva són bosons. L'espín és una propietat quàntica que no té cap referent clàssic. Podríem dir que apareix a partir d'una “mena” de rotació interna de la partícula.

Els bosons, com els fotons d'una ona electromagnètica, són partícules “sociables” i poden compartir un mateix estat quàntic. Això no ocorre amb els fermions, com els electrons, els protons i els neutrons, que són totalment “insociables”, com afirma el *principi d'exclusió de Pauli*.

Un àtom consta d'un *nucli*, format per *neutrons* i *protons*, i d'*electrons* que orbiten entorn d'aquell. Totes aquestes partícules fermiòniques “insociables” ocupen estats quàntics diferents. En particular, podem “interpretar” que els electrons d'un àtom es distribueixen en òrbites distintes entorn del seu nucli per tal de no coincidir “socialment”.

Altrament, els fotons o partícules de la llum són bosons “sociables”. Un *raig làser* està format per un nombre considerable de fotons “sociables” que poden estar en un mateix estat quàntic i col·laboren per crear un flux altament energètic.

Una partícula podrà estar sotmesa a una interacció determinada si té una propietat concreta que la faci sensible a l'acció dels transmissors de la “força” interactiva. Aquestes són les propietats que fan possible que una partícula pugui ser afectada per cadascuna de les interaccions:

- *Interacció gravitatòria->La *massa*.
- *Interacció feble->La *càrrega d'isoespín feble*.
- *Interacció electromagnètica->La *càrrega elèctrica*.
- *Interacció forta->La *càrrega de color*.

En general, per a cada *partícula* existeix una altra de diferent, anomenada, *antipartícula*, amb la mateixa massa. Amb l'*equació de Dirac*, ans esmentada, es féu la predicció teòrica de l'existència de les antipartícules. Les propietats d'una partícula i de la seva antipartícula són complementàries en un cert sentit i, en el cas més freqüent, ambdues es distingeixen per valor oposat de la seva càrrega elèctrica. És el que ocorre entre l'electró i la seva antipartícula, el positró, o entre el protó i l'antiprotó. La matèria i l'antimatèria no poden entrar en contacte ja que, si ho fessin, s'autodestruïrien amb l'emissió d'una radiació de fotons. En un futur hipotètic podríem tenir una font immensa d'energia, si dins de l'univers trobéssim quantitats importants d'antimatèria que es poguessin destruir en contactar amb la matèria corresponent.

Hi ha algunes partícules molt concretes, com els fotons, que coincideixen amb les seves antipartícules.

Quan una partícula, com el neutrí o el neutró, no té càrrega elèctrica, la seva antipartícula tampoc en té i ambdues es distingeixen per altres propietats.

Les partícules que no estan sotmeses a la interacció forta s'anomenen *leptons* i les que sí ho estan s'anomenen *hadrons*. Les simetries “gauge” estan en els fons de la classificació unitària de moltes de les partícules que seguiran.

El conjunt de leptons elementals, tots ells fermions, està format per aquestes partícules i les antipartícules corresponents:

**Electró i neutrí electrònic.*

**Muó i neutrí muònic.*

**Tauó i neutrí tauònic.*

Els electrons, muons i tauons tenen la mateixa càrrega elèctrica (-1). Els neutrins no tenen càrrega elèctrica i interaccionen molt dèbilment amb la matèria. De fet, en aquest moment milions d'ells travessen els nostres cossos sense que ens n'adonem!

El conjunt d'hadrons elementals, tots ells fermions, està format per aquests quarks (entre parèntesis hi ha les càrregues elèctriques respectives) i el seus corresponents antiquarks:

**Quark d (-1/3) i quark u (+2/3).*

**Quark s (-1/3) i quark c (+2/3).*

**Quark b (-1/3) i quark t (+2/3).*

Tots els quarks tenen càrregues elèctriques fraccionaries en relació a la de l'electró i no poden ser observats. Només poden ser-ho indirectament, a través dels seus efectes. La *cromodinàmica quàntica* estudia la interacció forta entre quarks, mitjançant una versió particular de la teoria quàntica de camps. En ella les partícules tenen una *càrrega de color*, que fa possible que siguin sensibles a la interacció forta. El color (vermell, groc i verd) no té el significat convencional i és només un nom per distingir les diferents càrregues de color de les partícules.

Mitjançant la combinació adient de quarks apareixen la resta de partícules (fermions i bosons). És el que passa amb els components del nucli atòmic, els neutrons i protons, tots ells fermions. Un protó està format per un quark d i dos quarks u , amb una càrrega total +1, mentre que amb dos quarks d i un quark u tenim un neutró, sense càrrega elèctrica.

Gràcies a la simetria, doncs, a hores d'ara s'ha posat una mica d'ordre dins de la multiplicitat de partícules i d'interaccions que hi ha a l'univers, tot fent palesa una unitat amagada en el fons d'aquesta diversitat aparent.

• **La gravitació quàntica.** Les teories de la relativitat general i la física quàntica són vàlides en els seus àmbits respectius. Tanmateix, hi ha dominis de la física en què

ambdues són incompatibles, com en l'estudi del principi de l'univers. S'han realitzat diferents provatures per solucionar el problema anterior i arribar a una unificació de les quatre interaccions, sense èxit encara (*teories de gran unificació* i *supersimètriques*, la *teoria de llaços*, la *geometria no commutativa*, la *gravitació semiquàntica*, les *teories de cordes* o la *teoria M*). La futura teoria que unifiqui les quatre interaccions i a partir de la qual es puguin deduir com a casos particulars la *teoria quàntica* i la *relativitat general* és la *gravitació quàntica*.

En la *teoria de cordes* tenim un espai-temps de deu dimensions i se substitueixen les partícules puntuals per petites cordes vibratòries d'una dimensió, on les diferents freqüències de vibració es corresponen amb les distintes partícules. Així com en un piano cada corda vibra amb una freqüència representativa d'una nota musical, en la teoria de cordes cada freqüència de vibració serà representativa d'una partícula concreta. La *teoria M* és una generalització de la teoria de cordes. En la teoria M tenim un espai-temps d'onze dimensions i en el seu si apareixen unes estructures anomenades *p-branes* amb *p* dimensions espacials. En particular, tenim les *0-branes* (les partícules puntuals), les *1-branes* (les cordes) i les *2-branes* (les membranes). Segons algunes teories físiques, molt especulatives encara, el nostre univers espacial tridimensional podria ser una *3-brana* situada *dins* d'aquella realitat d'onze dimensions.

REFLEXIONS ENTORN DE LA FÍSICA **DEL SEGLE XX**

UNA NOVA VISIÓ DEL MÓN ENS PORTA A **UNA NOVA ACTITUD VITAL**

El que hem exposat fins ara, amb les excepcions òbvies que han anat apareixent, és el que en el moment actual comparteix pràcticament tota la comunitat científica. Tanmateix, i compilant de nou el que afirmàvem en el pròleg, el positivisme està profundament arrelat dins de la immensa majoria de científics i més enllà del que les teories pronostiquen, quant a les dades experimentals, ells abandonen i fins i tot ridiculitzen tota especulació agosarada que es faci entorn d'aquelles. L'home, però, no pot prescindir de fer-se preguntes i de donar-hi respostes amb el risc evident d'equivocar-s'hi. ***És el que nosaltres farem a partir d'aquest moment, tot remarcant amb lletra negreta l'escriptura de les conclusions més heterodoxes del nostre raonament físic.*** Seguint el consell d'*Erwin Schrödinger*, *la noblesa no ens obliga a ser prudents*, i amb aquest esperit en el que segueix contemplarem aspectes totalment acceptats per tothom i, a més, uns altres que entren plenament dins de l'especulació i el dubte. Ho sabem i n'acceptem el risc, de l'error, com afirmàvem feia un moment. No hi trobareu la precisió científica, pràcticament absent. Només desitgem que *escolteu* unes reflexions fetes a partir de la *provisionalitat* del que la física moderna ens diu ara. Creiem que tot el que seguirà pot ser raonablement versemblant, cosa que amb les concepcions que sobre la realitat física té avui la majoria dels homes només pot admetre's acceptant moltes més contradiccions de les necessàries, de les quals, per altra banda, no podrem alliberar-nos-en totalment.

La fantasia de l'infant fa possible la imaginació de l'adult, que, altrament a aquella, està ancorada en el món real conegut i l'ultrapassa. Aquí intentarem fer un exercici d'imaginació, però això no ens garanteix la veritat de les realitats imaginades, que no podrien ser altra cosa que una forma subtil de fantasia. És, però, això un problema, si durant uns instants ens hem apropiat a unes *realitats diferents* que ens han fet canviar *realment*?

LA UNITAT DEL MÓN

La localitat física és aquella propietat que fa que dos esdeveniments separats *espacialment* no es puguin influir entre ells a través d'una transmissió material dins de l'espai-temps. Hem vist abans que els sistemes microscòpics, que han estat units íntimament, conserven la seva unitat, mitjançant *connexions no locals*. Aquestes connexions serien independents de la distància a què es trobessin les partícules i, en conseqüència, hi romandrien al llarg del temps. Es podrien interpretar, només interpretar!, *com si* fossin degudes a la *transmissió informativa* a velocitats superiors a la de la llum, com dèiem, i no es realitzarien a través de cap transmissió material, perquè es violarien els principis de la relativitat, que és una teoria local espaciotemporal. Recordem que, d'acord amb la relativitat especial, la correlació entre dos esdeveniments, A i B, que estan separats per un *interval espacial* pot interpretar-se, segons els diferents observadors, de tres maneres diferents:

- a) Els dos col·lapses en A i B ocorren simultàniament.
- b) El col·lapse en A és anterior al col·lapse en B.
- c) El col·lapse en B és anterior al col·lapse en A.

Semblaria, doncs, que el principi de causalitat convencional quedés violat, però això és fals; en efecte: podem salvar el problema anterior amb l'afirmació que *cap col·lapse és causa de l'altre* perquè no hi ha dos col·lapses diferenciats, sinó un únic col·lapse de la totalitat. És el que el formulisme matemàtic de la física quàntica afirma quan diu que en un sistema compost l'únic estat quàntic veritable és el de tot el sistema i és aquest el que en realitat experimenta el col·lapse, del qual els col·lapses dels subsistemes són merament aspectes parcials d'una multiplicitat aparent dins d'una unitat superior. Com dèiem abans, tenim sistemes quàntics *entrellaçats* connectats *no localment*.

Tanmateix, si hi ha un únic col·lapse, per què poden observar-se tres situacions amb col·lapses individuals tan diferenciats? L'absurd de tot plegat és *només* degut al llenguatge i al pensament entorn de la multiplicitat, la causalitat i la temporalitat, basats en la nostra experiència quotidiana i la nostra consciència habitual (podríem parlar-ne d'una altra manera?).

Si acceptéssim la realitat de la unitat del món per damunt de la seva multiplicitat i que les entitats separades no són altra cosa que una il·lusió deguda a una visió limitada, fariem quelcom semblant al que *Einstein* féu quan afirmà la realitat de la constància de la velocitat de la llum en el buit i que les idees tradicionals de l'espai i del temps eren una il·lusió deguda a una experiència limitada. La diferència estaria que en la teoria de la

relativitat la nova visió seria deguda al canvi de les condicions externes, mentre que en el cas que ens ocupa ho seria, *potser*, a causa del canvi intern de la consciència. I de la mateixa manera que el nou pensament de la relativitat forçà un canvi de les condicions externes per poder visualitzar una nova realitat, assumir la *unitat* del món *podria* provocar-nos un canvi intern que ens permetés una nova visió del món.

Aquesta visió podria ser, *en part*, l'experiència *inefable* de què *parlen* els místics. Es tracta realment de quelcom paradoxal, però no hi ha cap altre camí per comunicar aquesta experiència als homes, malgrat saber que *allò parlat no és allò de què es parla*.

La no-localitat quàntica té implicacions molt profundes i mereix ser tractada amb un xic més de deteniment. Malgrat les dificultats que podem trobar-nos-hi, s'ho val. Vegem-ho a continuació.

Einstein, Podolsky i Rosen estudiaren *teòricament* un sistema de dues partícules que després d'interaccionar se n'allunyaven suficientment per garantir que entre dos esdeveniments d'ambdues no pogués haver-hi una connexió material local (*experiment EPR*). El col·lapse d'una d'elles era seguit pel col·lapse de l'altra de tal manera que ambdós col·lapses es manifestaven amb unes propietats objectives completament correlacionades.

- *L'existència exclusiva de connexions locals impediria qualsevol comunicació entre les dues partícules i això implicaria que elles haurien de tenir aquelles propietats objectives prèviament als col·lapses (l'element de realitat d'Einstein) (1).*

Per tant, aquí apareixia una incompatibilitat amb la teoria quàntica, on és absent aquell element de realitat, i aquest fet ens feia *intuir* la necessària presència de connexions no locals.

John S. Bell en l'estudi teòric d'una experiència molt determinada tipus *EPR* demostrà que no podien donar-se simultàniament aquestes dues condicions:

- a) *Les prediccions estadístiques de la física quàntica són correctes.*
- b) *Els sistemes quàntics tenen un element de realitat i només estan sotmesos a connexions locals.*

Les prediccions de la física quàntica resultaren ser experimentalment certes.

- *Aleshores, si els sistemes quàntics estan sotmesos únicament a connexions locals, no podran tenir un element de realitat previ (2).*

La unió de les conclusions (1) i (2) ens permet afirmar *l'existència física de connexions no locals*.

Podria semblar que la no-localitat fos aliena als sistemes macroscòpics, com nosaltres, i que només pogués ser aplicable als sistemes microscòpics, com els electrons. Res més lluny de la realitat. La importància de les conclusions del *teorema de Bell* està

que poden haver-hi connexions quàntiques no locals, fins i tot, entre sistemes macroscòpics.

Aquest tipus de connexions podrien ocórrer també entre esdeveniments que estiguessin separats temporalment. Així, una acció realitzada aquí i ara podria influir en un esdeveniment situat a una distància de 300 km dos anys més tard! En aquest darrer cas, malgrat que aleshores fos possible una connexió de forma local i material a través de l'espai i del temps (a l'espaitemps la física és sempre local amb transmissions que no ultrapassen la velocitat de la llum!), aquella connexió no local es continuaria realitzant més enllà d'ells, *com no podria ser d'una altra manera*, i aleshores un esdeveniment podria ser pertorbat per altres esdeveniments diferents sense cap mena d'influència material o energètica significativa.

Vegem ara tot l'anterior d'una manera intuïtiva. En un sistema *caòtic*, canvis infinitesimals de les seves condicions donen lloc a bifurcacions (evolucions divergents amplificades on tot el sistema es transforma d'acord amb aquells canvis) que són causades pels seus col·lapses quàntics interns.

La qüestió essencial consisteix a saber com es poden produir aquests col·lapses microscòpics dins d'un sistema. Podem considerar aquestes dues possibilitats:

- a) El sistema té un col·lapse quàntic induït localment.
- b) El col·lapse quàntic induït té el seu origen en una connexió no local.

Comencem comentant l'apartat a). El nostre sistema pot estar sotmès a una acció externa o interna mitjançant les interaccions físiques conegudes. És el que pot ocórrer amb una mutació genètica aleatòria, causada per una radiació, que doni lloc a canvis físics favorables o desfavorables, o amb un canvi climàtic sobtat degut a una petita variació local de les condicions meteorològiques. És també el que pot passar amb el canvi insospitat de l'estat d'ànim d'una persona coneguda quan directament ens comuniquem amb ella. En tots els casos l'efecte caòtic és totalment assumit per nosaltres ja que no condueix a cap canvi essencial dels nostres conceptes habituals.

Quant a l'apartat b), podríem establir *amb tota la prudència* les hipòtesis i conclusions que segueixen:

*** Les connexions microscòpiques que es crearen en el Big Bang i en els esdeveniments posteriors a ell romandrien al llarg del temps de forma no local, i hi hauria una unitat essencial en tot l'univers.**

*** Un col·lapse quàntic microscòpic dins d'un sistema físic macroscòpic tindria una influència no local que podria provocar un col·lapse microscòpic dins d'un altre sistema macroscòpic que el faria bifurcar caòticament.**

*** *Les connexions no locals implicarien que les equacions evolutives dels sistemes físics fossin no lineals i aquesta no-linealitat permetria l'emergència dins del món de propietats radicalment noves.***

En la teoria darwinista clàssica les mutacions genètiques aleatòries conjuntament amb la selecció natural produïda pel medi ambient donen lloc a l'evolució. Podem explicar a través d'aquest procés l'aparició d'un sistema tan perfecte com el d'un organisme viu? Més aviat creiem que no, ja que la seva probabilitat seria molt minsa. Tanmateix, la unitat no local pot oferir-nos-en una explicació molt més factible. Efectivament: els canvis del medi ambient podrien “*informar*” no localment els éssers vius, en els quals es produiria una bifurcació genètica correlacionada amb aquells canvis ambientals d'una forma desconeguda per nosaltres a hores d'ara. La selecció natural faria la resta. Es tractaria de *l'evolució quàntica*. En particular, el fenomen del *mimetisme* que adopten els éssers vius per sobreviure podria explicar-se a través del mateix procés anterior.

Les conseqüències del teorema de *Bell* han canviat la nostra visió del món: la realitat no pot continuar essent com ens imaginàvem! El mateix passa amb el teorema de *Gödel*, que veurem més endavant i que resulta tan o més paradoxal.

EL BUIT QUÀNTIC

El formulisme de *la teoria quàntica de camps* de les interaccions físiques explicita la creació i destrucció de partícules a partir de l'existència d'un sistema quàntic molt especial: *el buit*. Normalment entenem el buit com l'absència *completa* de qualsevol entitat física, però això és una veritat parcial.

El *principi d'incertesa de l'energia* permet la materialització de l'energia dins de l'espai-temps des del buit. Aquesta energia no pot ser arbitrària i dependrà del seu temps de vida: amb un temps de vida petit es pot crear una energia superior a la que tindríem amb un temps de vida més gran. Veiem, doncs, que el principi de conservació de l'energia pot ser violat durant un temps de préstec.

Per als sistemes macroscòpics, amb un temps de vida molt gran, el principi esmentat condueix a la conservació de l'energia habitual, a efectes pràctics. Això és degut que la variació de l'energia és molt petita relativament al valor enorme de l'energia d'un sistema macroscòpic.

El buit, doncs, és una realitat física amb molta activitat. Des d'ell es creen contínuament partícules que desapareixen més tard. Podem interpretar aquest fenomen d'acord amb l'analogia que segueix:

* *En una ona de l'oceà les seves crestes s'endinsen a l'aire, desapareixen dins de l'aigua i neixen de nou a l'atmosfera amb unes característiques totalment correlacionades amb les de les crestes que han mort.*

* *En un procés físic, a partir de la destrucció d'unes partícules, es poden crear unes altres que tenen unes propietats relacionades íntimament amb les de les partícules que han desaparegut (la conservació de l'energia, per exemple).*

* *Les crestes de les ones que desapareixen de l'atmosfera deixen la seva petjada dins de l'oceà perquè a través d'ella unes altres neixen.*

* *Les partícules desapareixen de l'espai-temps i a través del buit informen sobre les seves propietats a les noves partícules que es creen dins de l'espai-temps.*

Vegem ara algunes conclusions del que acabem de dir:

a) L'activitat frenètica del buit s'ha comprovat amb l'efecte *Casimir*. Si tenim dues plaques metàl·liques molt properes, es creen contínuament partícules entre ambdues plaques i a l'exterior d'elles, que desapareixen més tard. Degut a les propietats ondulatòries de la matèria, només podran existir ones d'una longitud d'ona concreta entre les dues plaques (és el mateix que ocorre en una corda de guitarra). En conseqüència, l'activitat creativa del buit a l'exterior serà més gran i també ho seran els impactes sobre

les dues plaques, que estaran sotmeses a una força d'atracció detectada experimentalment (efecte *Casimir*).

b) L'activitat del buit permet també explicar la radiació energètica dels forats negres. No dèiem, però, que no podia sortir res des de dins d'un forat negre? Vegem com la física quàntica pot permetre el que la gravitació general impedeix. La creació de matèria des del buit *a la vora de l'horitzó* pot interpretar-se *matemàticament* mitjançant la creació de parelles de partícules d'energia positiva i negativa, respectivament. Això serà possible durant un temps, degut al principi d'incertesa de l'energia. El temps, però, serà suficient perquè la partícula amb energia negativa caigui dins del forat, tot originant la disminució de massa del forat i la creació neta de matèria exterior. Podrem, finalment, calcular la distribució energètica de la matèria emergent i la seva temperatura equivalent: es tracta de la *radiació de Hawking*.

El temps propi en què ocorre l'anterior serà petit, però per a un observador llunyà serà gran: veurem una radiació contínua que provindrà de "l'evaporació" de la matèria del forat negre. Aquesta matèria podrà ultrapassar l'horitzó del forat negre i anar més enllà del que les lleis físiques clàssiques de la relativitat general permeten, gràcies a la incertesa i a l'indeterminisme quàntics que produiran un efecte semblant al d'un *túnel* que ens permetés travessar una muntanya i comunicar les seves dues bandes. La temperatura del forat negre anirà creixent, en disminuir la seva massa i l'horitzó, i augmentarà cada vegada més la velocitat de la radiació. Aquest efecte serà negligible per als forats negres més comuns, però podria ser important per als petits forats negres creats als inicis de l'univers.

c) L'energia gravitacional de l'univers és negativa i quan la sumem a l'energia de la matèria obtenim una energia total de l'univers nul·la o gairebé nul·la. En conseqüència, l'univers podria ser creat des d'un buit primordial durant un temps de préstec molt gran (la seva edat) al final del qual seria, potser, destruït. *A l'origen de l'univers, aquell buit crearia la matèria-energia i, d'acord amb la relativitat general, l'espai i el temps, però romandria més enllà d'ells.* Segons aquesta concepció, des del buit podrien crear-se "contínuament" universos que naixerien, evolucionarien i finalment podrien morir retornant al buit. Fins i tot, podria ocórrer que un univers fos fill d'un que hagués mort "abans", el qual deixaria dins del buit la *informació* de la seva història prèvia, perquè el nou univers no tingués un naixement exclusivament sotmès a l'atzar. Estem parlant del conjunt de múltiples universos (el *multivers*) nascuts del buit i immersos en ell.

d) La *física quàntica de camps* defineix el buit quàntic a partir de l'espai en absència de matèria. Tanmateix, acabem de parlar de la creació de l'univers espaciotemporal des d'un hipotètic buit primigeni. Com podem resoldre aquest dilema? Part de la comunitat científica està convençuda que la identificació *exclusiva* del buit

amb el nostre espai buit de matèria és una interpretació que sorgí en un principi a causa de l'esperit positivista que impregnà el món científic d'aleshores i que impedí l'acceptació d'aquelles realitats situades més enllà de les espaciotemporals. Si les inestabilitats quàntiques del buit fossin un fenomen essencial de la realitat, aquest buit també hauria de poder acollir en el seu si tot l'univers (o tots els universos del multivers) i tindria unes propietats ben allunyades de les espaciotemporals del món. Vegem-ho ara, tot fent unes reflexions entorn d'aquest buit primigeni.

Actualment el problema essencial de la física està en trobar una teoria de la *gravitació quàntica*, des de la qual ens apareguin com a casos particulars les teories *quàntica* i *gravitacional relativista* i s'unifiquin les quatre interaccions. Fins ara hi ha hagut molts d'intents, com dèiem abans, (teories de *gran unificació* i *supersimètriques*, teoria de *cordes* i teoria *M*, teoria de *llaços*, *geometria no commutativa*, etc), però cap d'ells ha arribat de forma definitiva a bon port.

Se n'han realitzat provatures més senzilles a partir de la física quàntica unida a la relativitat general (*gravitació semiquàntica*) per a l'estudi de l'univers per part de *Hartle-Hawking* i de *Linde-Vilenkin*. Malgrat les seves diferències, aquests estudis, i d'altres, tenen en comú que a l'univers apareixen dos dominis: en el "primer" domini el temps, com a tal, no existeix "de forma permanent" i des d'ell passem al "segon" domini que correspon al nostre univers conegut. De la mateixa manera que a l'univers va aparèixer en primer lloc la llum que viu tots els seus moments en un instant d'eternitat *hereu* d'aquell primer domini, és molt possible que aquest fos també *hereu* de l'atemporalitat del buit situat més enllà d'ell. L'evolució des de la inestabilitat quàntica del buit fins al moment del Big Bang no transcorreria totalment en el temps. És possible això? Sí. Les transformacions matemàtiques pures i moltes de les teories actuals ho confirmen.

Anem ara a fer-nos una imatge, només una imatge, d'aquest buit. Suposem que el nostre món estigués dins d'un espai geomètric pur de més de tres dimensions. Aquesta realitat es impossible de visualitzar, però podem fer-ho intuïtivament, a través d'una imatge tridimensional. Dins d'un espai geomètric tridimensional podríem tenir una superfície bidimensional. Aquesta superfície representaria un univers de dues dimensions espacials. Mentre no s'assolís el *temps de Planck* ($T_P=10^{-43}$ s) ni la *longitud de Planck* (la distància, $L_P=10^{-33}$ cm, recorreguda per la llum en el *temps de Planck*) no hi hauria ni l'espai, ni el temps coneguts, ja que ells no són continus i els seus valors mínims serien aquelles quantitats que hem esmentat anteriorment. A partir d'aquí la superfície bidimensional esdevindria el nostre univers material i espacial immers en aquell espai tridimensional. Aleshores, si tornéssim a la nostra realitat física, l'univers *podria* ser, segons la teoria M, una 3-brana dins d'una realitat d'onze dimensions, però hi hauria també moltes altres possibilitats. No sabem gairebé res d'aquesta època tan llunyana i

són tantes les teories, totes elles especulatives a hores d'ara, que rivalitzen en el seu estudi! Tanmateix, seria prou *versemblant* que el nostre univers (o un hipotètic multivers) *pogués* estar immers dins d'un domini multidimensional més gran, origen de la seva manifestació i que anomenem *buit* per estar "*buit*" d'algunes de les propietats comunes del nostre món habitual, com la temporalitat.

Després d'aquesta petita incursió especulativa a través d'un hipotètic buit primordial, podem tornar al nostre buit quàntic més convencional que situem *aparentment* dins de l'espai. Tanmateix, aquesta aparença és falsa i el que en realitat ocorre és tot el contrari: el buit "espacial" no seria res més que una part del fons del buit primordial en contacte immediat amb el nostre univers. De fet, a partir d'ara no farem la distinció ans esmentada i parlarem simplement del buit: aquesta realitat que es "condensa" en el nostre univers o en el conjunt d'universos del multivers.

**** L'espai temps estaria endinsat en una realitat física i "dinàmica" més àmplia, a la qual anomenem buit, perquè està buida de les propietats convencionals del nostre món conegut.***

Un dels grans problemes de la física actual està en saber les raons profundes que hi ha darrere de les manifestacions fenomenològiques de la matèria-energia i de les seves interaccions. Per què les masses de les partícules i les interaccions entre elles són les que són? És molt possible que la causa darrera de tot això estigui en l'activitat del buit quàntic. En relació al que acabem de dir, l'existència de les masses de les diferents partícules seria deguda, en part, a la presència universal, com la del buit mateix, d'un camp que es materialitzaria en una partícula molt especial que interaccionés amb tota la resta: es tractaria del bosó de *Higgs* que la comunitat científica està buscant des de fa molt de temps sense èxit fins ara, a causa que els acceleradors actuals de partícules no poden produir energies suficientment elevades. Cal esperar els resultats que n'obtinguem amb l'accelerador de partícules de Ginebra (el major projecte tecnològic mai realitzat per l'home), que amb una longitud circular de 27 km farà possible tenir partícules molt energètiques que, després de la seva col·lisió, donin lloc a la materialització del bosó de *Higgs*, si realment existeix, i d'altres partícules, insospitades a hores d'ara. Això ens conduirà molt probablement a un coneixement més profund de les lleis físiques del món i de l'origen de l'univers.

Willem de Sitter obtingué a partir de la *relativitat general* una solució corresponent a un univers buit de matèria i amb una elevada taxa d'expansió (*univers inflacionari*). Això fou possible gràcies a la presència a l'*equació d'Einstein* d'un terme anomenat *constant cosmològica* i relacionat actualment amb l'*energia del buit* quàntic. La constant cosmològica produí un efecte *repulsiu*, oposat a l'efecte gravitacional atractiu que origina la matèria. Com podem entendre aquest efecte? Vegem-ho. En relativitat general la

pressió és causa de gravitació: si és positiva i actua cap a enfora, atrau i, si és negativa i actua cap a endins, repel·leix! Es tracta d'un resultat paradoxal, però cert. El valor concret de la constant cosmològica introduïda produí una pressió negativa que seria la causa final de l'expansió inflacionària.

S'ha comprovat experimentalment que la velocitat d'expansió de l'univers actual creix acceleradament, en contra del que hauria d'ocórrer si només hi actués l'atracció de la gravitació material que l'aniria desaccelerant amb el temps. Una de les explicacions possibles d'aquest efecte de repulsió estaria en la presència d'aquella constant cosmològica de què acabem de parlar. La composició energètica de l'univers actual seria d'un 73% d'energia del buit i d'un 27% corresponent a la matèria. La matèria seria en la seva major part matèria "*exòtica*" i només una petita proporció correspondria a la matèria ordinària. Tant l'energia del buit com la matèria exòtica no són prou conegudes a hores d'ara. La comprensió d'ambdues realitats ens pot portar a conseqüències imprevisibles en la nostra visió actual del món.

ULTRAPASSANT L'ESPAI I EL TEMPS

Les connexions no locals ens permeten afirmar la unitat espaciotemporal més enllà de l'espai i del temps. Dins de l'àmbit de la física hi ha, a més de la realitat material de l'espai-temps, la realitat del buit. Podria estar el buit a l'origen de la unitat del món? Vegem-ho.

Recordem que a través del buit es desenvolupen els processos físics de destrucció i creació de partícules, de tal manera que quan es destrueixen unes partícules i es creen unes altres, hi ha una *correlació* entre les propietats d'ambdues.

Nosaltres estem endinsats a la multiplicitat espaciotemporal i necessitem de les seves imatges, quan pensem, per ajudar-nos a la comprensió de la unitat. En aquest sentit, com pot ser possible aquella correlació, si unes partícules ja no existeixen? Què ha passat perquè aquella correlació, malgrat el que acabem de dir, es produeixi? Hauríem d'admetre que les partícules destruïdes desapareixerien de l'espai-temps, però a través de les *petjades* que haurien deixat al buit *informarien* la creació d'unes altres, com comentàvem abans.

No podria ocórrer que el fenomen anterior fos universalment vàlid per a tots els esdeveniments espaciotemporals, de tal manera que tots ells sense distinció deixessin les seves petjades en el si del buit?

Si això fos cert, quina propietat haurien de tenir aquestes petjades perquè la no-localitat quàntica pogués ser acceptada amb totes les seves conseqüències? Segons hem vist abans, la no-localitat també existiria entre esdeveniments separats temporalment. Dèiem que un esdeveniment situat aquí i ara podria influir no localment sobre un altre situat en un altre lloc i en un temps posterior, sense la necessitat de cap interacció coneguda. *Això només seria possible si la petjada d'aquell esdeveniment no desaparegués i fos accessible en qualsevol lloc i en qualsevol instant.* L'analogia amb les ones del mar que abans hem fet ens permet intuir amb un símil aquesta "eternització". Dins del mar la informació registrada en ell va disminuint al llarg del temps a causa del fregament intern. Tanmateix, aquest fregament no apareix en el cas del buit... no sentim la seva presència a través de les interaccions convencionals i el buit és inexistent aparentment per a nosaltres quan ens movem a través d'ell! En conseqüència, semblaria que la informació generada dins del buit des de l'espai-temps no es degradés.

Podem resumir així les hipòtesis *agorades* que fins ara hem establert:

- *Tot quan esdevé al món deixa una petjada dins del buit quàntic.*
- *Aquesta petjada roman “eternitzada” i és accessible des de tots els esdeveniments espaciotemporals.*
- *La informació continguda en el buit uneix tots els esdeveniments, més enllà de l’espaitemps, i constitueix un segon nivell de la realitat física que ultrapassa la temporalitat.*
- *A través d’aquella “eternització” seria factible que els esdeveniments de tot l’univers es poguessin influir no localment, si més no, parcialment.*

A través de l’*holomoviment* el físic *David Bohm* ha estudiat en profunditat les relacions entre el món *manifest, desplegat o explicat* dels fenòmens i la realitat *no manifesta, plegada o implicada* dins del buit quàntic. *Bohm* i el pensador *Krishnamurti* tingueren llargs i profunds diàlegs sobre la física, la religió, la filosofia i la bellesa. De les moltes converses que ells mantingueren sorgiren reflexions conjuntes sobre tot el que acabem de dir. Oferim a continuació un petit recull, recreat per nosaltres, d’aquelles reflexions:

L’ordre *explicat, desplegat o manifest* és només algun aspecte de l’ordre *plegat o implicat* dins del buit, una ona, un rínxol, en el si d’allò que no és manifest.

El moviment d’ascens i de descens entre els ordres *explicat i implicat* és l’*holomoviment*, el moviment bàsic del món que no es realitza en l’espaitemps.

El plegament dóna lloc a les connexions físiques i a la unitat profunda.

En l’ordre *plegat* no hi ha l’ordre temporal convencional i tot està profundament implicat.

L’existència material és *holomoviment* manifestat de forma relativament estable des del mar d’energia del buit.

La connexió entre els instants no es dóna en el temps sinó en l’ordre *implicat*, que és atemporal.

Amb la intuïció, més enllà del pensament, entrem en contacte amb quelcom més profund: allò no manifest que pot actuar sobre el pla de la manifestació.

Si per “entendre” la física quàntica cal acceptar nous conceptes, per “entendre” aquesta realitat profunda cal anar més enllà dels conceptes.

La corrupció d’allò no manifest és la causa fonamental dels mals del nostre món. L’ordre implicat és etern, però no “invariable”. Podem purificar la consciència general del món des d’aquest petit racó nostre, mitjançant el contacte i transfiguració de l’ordre implicat.

Si totes les manifestacions són ones del buit, aquest no ens separa, sinó que ens uneix.

Més enllà d’aquest buit està el que és fora de tot discurs.

La veritable individualitat no existeix si no està ancorada en la totalitat, altrament tenim egoisme. La individualitat és universal i allò universal és individual. El que és essencial és l’harmonia entre la unitat i la diversitat. Lluny de la fragmentació apareix la florida des de la profunditat no manifesta que ens uneix i que porta aparellada la bellesa.

L’eternitat de l’ordre implicat es desplega en el temps. El temps és un enriquiment de l’eternitat. L’eternitat és afectada pel temps. Allò que hem assolit en el temps torna a l’ordre implicat i serà una llavor d’una nova època.

Hi ha un ordre *superimplicat* que *informa* l’ordre implicat. Aquella *informació* inclouria tot el passat i tot el present.

La matèria és una condensació de la llum. La llum viu en un estat d’eternitat. En l’ordre implicat l’estat d’eternitat és la realitat primordial. La llum porta informació i quan conflueixen molts raigs hi ha la condensació de la matèria manifesta. L’oceà d’energia es pot concebre com un oceà de llum i la informació fa possibles les ones concentrades de matèria manifesta.

El que és essencial és l’holomoviment, com en la teoria de la relativitat ho és la velocitat de la llum.

El grau d'evolució d'un sistema físic determina la seva llibertat i el seu comportament moral. Aquests provenen, sobretot, de la recepció de la realitat no manifesta de l'univers i de la resposta a aquesta realitat.

****La informació memoritzada al buit, en estar allunyada de la realitat espaciotemporal coneguda, es conservaria i transfiguraria, i podria ser accessible des de qualsevol lloc i des de qualsevol instant en què ens trobéssim.***

****Tots els temps i tot l'espai romandrien units i, a través d'aquella connectivitat, el passat, el present i, potser en part, el futur es fondrien.***

Aquesta unitat de tots els temps esdevindria real *dins del buit*, si podem dir-ho així. Si nosaltres poguéssim contemplar aquesta unitat amb una ment buida, més enllà del pensament que es desenvolupa al llarg de la temporalitat, podríem, potser, veure que tota l'explicació que hem donat és insuficient i que la memòria del món és només una pobre manera per poder racionalitzar la unitat que ultrapassa el pensament a causa dels nostres hàbits intel·lectuals.

Vegem a continuació unes ràpides reflexions entorn de la llibertat humana i de la seva compatibilitat amb la realitat del món que coneixem.

Perquè la llibertat d'un sistema fos possible caldria, almenys, que es complissin dues condicions:

- a) Que la seva evolució fos no determinista.
- b) Que aquesta evolució no estigués completament condicionada per la resta del món.

És molt probable que el nostre cervell sigui un sistema quàntic i caòtic. La primera propietat asseguraria la seva evolució *no determinista* i la segona possibilitaria una transformació macroscòpica no lineal *autònoma* de presa de decisions. Si tot això fos cert, el coneixement físic del món seria compatible amb l'existència de la llibertat humana intuïda a través de les nostres conviccions més profundes.

En un estat de consciència on fos possible la visió de la unitat del món podríem actuar dins d'un nivell superior de la realitat sense els condicionaments de l'espai i del temps. *Potser la llibertat només pot ser entesa actuant en aquest altre nivell, completament aliena a les conseqüències d'un possible determinisme espaciotemporal que pogués haver-hi.* Una ment buida, lliure de les limitacions del temps i dels prejudicis intel·lectuals adquirits, seria aleshores una ment que actuaria correctament a través de la unitat no local del món. Aquest seria, potser, el veritable significat de la llibertat.

ELS “KOANS” DE LA FÍSICA

Dins de la tradició zen un koan és una afirmació aparentment paradoxal o absurda. A través de la concentració en un koan el mestre força en el deixeble un salt intuïtiu que el porta a la comprensió de la realitat més enllà del pensament i de les paraules.

Al llarg de les passades reflexions ens hem acostumat a molts aspectes de la realitat que han estat assimilats amb dificultats, però ho han estat, finalment. Tanmateix, hi ha alguns “koans” incomprensibles que ens poder fer avançar en aquella comprensió de què parlàvem. Vegem-ne uns quants:

- a) D’acord amb la *relativitat especial* podríem concloure que tot l’espai-temps és real. En contra de la nostra experiència, el passat, el present i el futur serien igualment reals, almenys parcialment.
- b) El temps té un “principi”, segons la *relativitat general*. Tot el que hem anat dient fins aquí ens porta a considerar que l’univers apareix a través d’un procés no temporal des d’on sorgeix el temps. Com podem entendre un procés que no transcorri en el temps?
- c) La *física quàntica* ens condueix a aquestes conclusions:
 - Hi ha una entitat, el buit, més enllà de l’espai i del temps. La realitat física està estructurada almenys en dos nivells.
 - Entre tota la realitat espaciotemporal hi ha connexions no locals, sense transmissió material. Hi ha una unitat sota la multiplicitat.

Tots els “koans” anteriors tenen en comú afirmacions entorn a la realitat de la multiplicitat material i espaciotemporal. Aquesta és la nostra experiència, el nostre llenguatge i el nostre pensament. I aquí rau l’existència de les paradoxes d’aquell llenguatge que ens té atrapats. Fins i tot, les possibles solucions incorporen els mateixos elements que volem negar, com és el cas de la “memòria” dins del buit, que abans hem introduït. *Només l’afirmació de la unitat del món, amagada dins de la multiplicitat espaciotemporal, permet obtenir-ne una nova visió intuïtiva d’allò que el món és, més enllà dels nostres esquemes mentals.*

ELS TEOREMES DE BELL I DE GÖDEL

Recordem que el teorema de *Bell* i les dades experimentals ens porten a la conclusió que la realitat física és no local. La no-localitat implica que aquestes connexions que apareixen a l'univers no es puguin realitzar per mitjans materials dins de l'espai-temps, perquè la velocitat de la llum seria ultrapassada, en contra d'allò que afirma la teoria de la relativitat.

Amb totes les precaucions, semblaria, doncs, que les noves connexions haurien de realitzar-se més enllà de la materialitat de l'espai-temps i que aquesta nova realitat física la podríem trobar al buit, la qual cosa ens portaria a l'existència, almenys, de dos nivells físics dins d'una unitat superior.

Fins ara només hem acceptat una visió física del món amb dos nivells, el visible i l'invisible. I si existís, a més, quelcom d'inefable, més enllà o més endins d'allò que puguem parlar amb seguretat? Cal insistir gaire per afirmar que tot el que diem aquí seria molt més versemblant encara? És, però, això possible? Vegem-ho a continuació:

a) Els dos teoremes de *Kurt Gödel* constitueixen el descobriment més transcendental de les matemàtiques del segle XX. En el primer d'ells s'afirma que, si el sistema *S* de l'aritmètica dels nombres naturals està lliure de contradiccions (sistema *consistent*), aleshores hi *haurà veritats matemàtiques que no podran ser demostrades* dins del propi sistema. La demostració d'un enunciat dins d'un sistema no seria, doncs, el criteri únic i indispensable per poder afirmar la seva veritat. En el segon teorema s'arriba a la conclusió que la consistència d'aquell sistema només pot obtenir la seva prova fora d'ell.

Podríem definir un sistema S_1 que ampliés el sistema *S* anterior i que anés més enllà d'ell. D'aquesta manera seria possible eliminar els aspectes conflictius de *S* a partir del sistema S_1 més extens. Tanmateix, dins del sistema S_1 ens apareixerien nous aspectes problemàtics que necessitarien d'un altre sistema S_2 més potent per ser solucionats. Aleshores, ens trobaríem amb una cadena infinita de sistemes per tenir la seguretat que tota veritat fos demostrable i que estiguéssim absents de contradiccions. Per tant, no podem evitar les importants conclusions dels teoremes de Gödel. Només un déu ho podria fer.

b) *Si l'univers fos gödelià, cap conjunt de principis físics podria donar raó ni de la totalitat de la seva realitat ni de l'absència de contradiccions dins d'ells. Hi hauria veritats no demostrables sobre el món i, a més, no podríem confiar plenament en aquells mateixos principis físics per parlar amb seguretat sobre la realitat del món. Només*

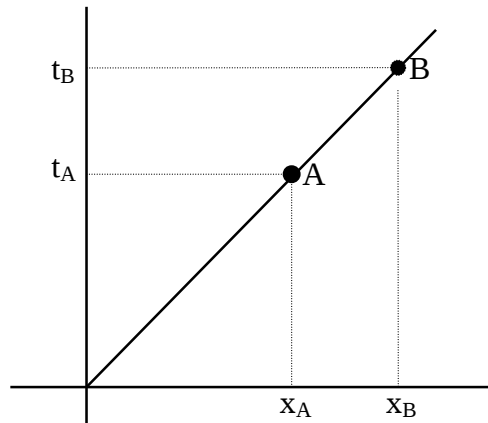
podríem aspirar que el nostre discurs sobre la realitat del món fos raonable a partir d'allò que sabem i, sobretot, d'allò que sentim en les profunditats del nostre cor:

****Sempre hi hauria l'obertura cap al que és desconegut i imprevisible; és a dir: cap allò que és sagrat.***

les rectes r i s es realitzaran a una velocitat inferior a c i seran físicament possibles, mentre que els que depenguin de connexions amb pendent inferior a l'esmentada necessitarien una velocitat superior a la de la llum i no tindran una existència real.

Les *connexions lluminoses* són les corresponents a moviments de raigs de llum (les partícules que es mouen a la velocitat de la llum són els *photons*) i les de pendents superiors i inferiors als de la llum s'anomenen *connexions temporals i espacials*, respectivament. Segons això, per exemple, les connexions OD, OF i GA són lluminoses, les OE, OA i OB són espacials i les OC, GO (des del passat de O a O) i AB són temporals.

L'INTERVAL ESPACIOTEMPORAL ÉS CONSTANT



A la figura anterior comprovem que per als esdeveniments A i B connectats per un raig de llum es verifica que

$$c = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} \Rightarrow c^2 \cdot (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 = 0.$$

Si ara tenim un altre observador O' , els mateixos esdeveniments tindran unes coordenades diferents i s'expressaran com $A(x'_A, t'_A)$ i $B(x'_B, t'_B)$. A causa de la constància de la velocitat de la llum per a tots els observadors es verificarà, també, la mateixa igualtat, $c^2 \cdot (t'_B - t'_A)^2 - (x'_B - x'_A)^2 = 0$.

Veiem, doncs, que si els esdeveniments A i B estan connectats per un raig de llum, es complirà la igualtat $c^2 \cdot (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 = c^2 \cdot (t'_B - t'_A)^2 - (x'_B - x'_A)^2$. A partir d'aquí es demostra que l'anterior igualtat també és vàlida per a qualsevol mena de connexions temporals o espacials, a més de les lluminoses.

Aquella quantitat que és invariant per als diferents observadors s'anomena *interval* i val $I = c^2 \cdot (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2$.

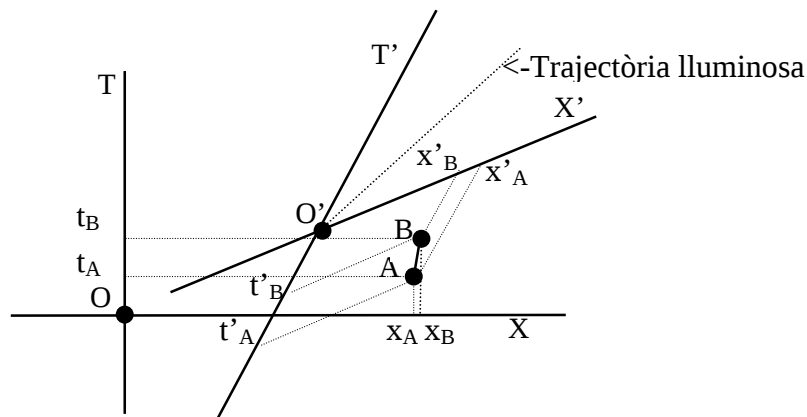
Si $I=0$ tenim un *interval lluminós*, si $I>0$ tenim un *interval temporal* corresponent a una velocitat $v<c$ i si $I<0$ tenim un *interval espacial* que correspon a una velocitat $v>c$, impossible físicament (els intervals espacials són possibles, però no es pot viatjar entre ells de forma material).

Un cos pot anar variant la seva velocitat al llarg del temps. La seva trajectòria en el diagrama espaciotemporal serà una corba de pendent variable i sempre més gran que el corresponent al de la llum. Aquesta trajectòria s'anomena *línia d'univers* (pensem tanmateix, que en el nostre cas els moviments es realitzen en una direcció unidimensional, malgrat que la representació espaciotemporal sigui bidimensional).

RELATIVITAT DE L'ESPAI I DEL TEMPS

Si els esdeveniments $A(x_A, t_A)$ i $B(x_B, t_B)$ per a l'observador O són visualitzats per un altre observador O' que es mogui en relació a O , aquells tindran les expressions $A(x'_A, t'_A)$ i $B(x'_B, t'_B)$, com dèiem abans. D'acord amb les conclusions de la teoria de la relativitat, les noves coordenades canviaran de forma que per a l'interval AB es verifiqui $c^2 \cdot (t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 = c^2 \cdot (t'_B - t'_A)^2 - (x'_B - x'_A)^2$. El nou eix T' estarà en la línia d'univers de l'observador O' i es demostra que, per tal que la quantitat anterior sigui invariant, X' s'obté a partir del X amb un gir oposat al de T' en relació al T i que les coordenades es transformaran d'una manera precisa, que veurem un xic més endavant, tot tenint en compte que apareix un factor d'escala en la interpretació dels valors de les noves coordenades en el sistema $O'X'T'$ (1 cm sobre $O'X'$ no significaria el mateix que 1 cm sobre OX).

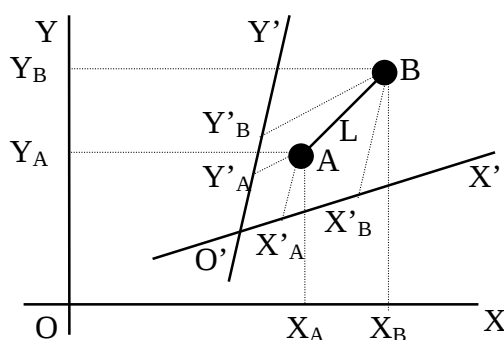
En conseqüència, les projeccions de l'interval AB sobre els nous eixos variaran i, per tant, $t_B - t_A \neq t'_B - t'_A$ i $x_B - x_A \neq x'_B - x'_A$, en general, com podem intuir a la figura següent:



Matemàticament, això es veu amb més rigor a partir de les transformacions finals de les coordenades per als dos observadors, que es comprova que són les que segueixen a continuació (*transformacions de Lorentz*), on v és la velocitat de O' en relació a O :

$$x_B - x_A = \frac{(x'_B - x'_A) + v \cdot (t'_B - t'_A)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1) \quad t_B - t_A = \frac{(x'_B - x'_A) \cdot \frac{v}{c^2} + (t'_B - t'_A)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Trobem, doncs, la invariància de l'interval I i, tanmateix, les mesures de les distàncies i dels temps no tenen el caràcter absolut que la nostra experiència ens dicta, sinó que són relatives i depenen de cada observador.



Salvant les distàncies, podem entendre aquestes afirmacions a partir de la figura immediatament anterior, que representa el nostre espai geomètric bidimensional ordinari. En ella tenim un segment geomètric AB de longitud L . Les projeccions espacials sobre dos sistemes de referència OXY i $O'X'Y'$ són diferents i, tanmateix, la longitud del segment és invariant. En relativitat, anàlogament, l'interval és invariant, però les projeccions espaciotemporals són relatives. En aquest sentit, el qualificatiu de teoria de la "relativitat" sembla prou desafortunat i així ho pensava el mateix Einstein, perquè en ella l'element fonamental és l'interval, que és absolut, i són només l'espai i el temps, que no són altra cosa que projeccions subsidiàries i "massa humanes" de l'interval, les que esdevenen relatives i, per tant, menys bàsiques.

També comprovem que $v < c$, ja que altrament els denominadors de les expressions anteriors no es podrien calcular de forma adequada (l'arrel quadrada d'un nombre negatiu no és real): no podem assolir o ultrapassar la velocitat de la llum.

Vegem ara unes conseqüències de la relativitat espaciotemporal.

•**Contracció de la longitud.** Si tenim un objecte en repòs en relació a l'observador O' i aquest es mou amb velocitat v respecte de l'observador O, quina serà la longitud L d'aquell mesurada per l'observador O, si L' és la seva longitud mesurada per O'?

És fàcil veure que $L = x_B - x_A$ i $L' = x'_B - x'_A$ i que necessàriament $t_B - t_A = 0$, ja que les coordenades de A i B han de ser mesurades per O en el mateix instant a causa del moviment conjunt de l'objecte i O'. D'aquí s'arriba a través de (2) i (1) a la relació

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Veiem, doncs, que $L < L'$ i per a O la longitud L de l'objecte ha disminuït en relació a la longitud L' mesurada per un observador unit a l'objecte (*contracció de la longitud*). O' podrà comprovar el mateix: per a O' també hi haurà una contracció dels objectes que es moguin amb O.

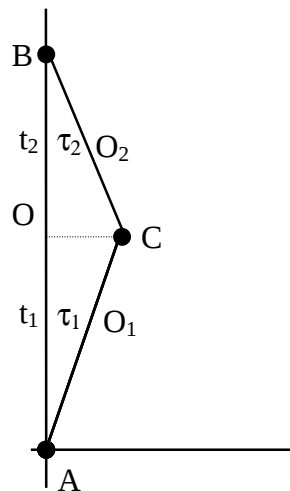
•**Dilatació del temps.** Suposem ara que l'observador O' es mou entre els esdeveniments A i B ($x'_B = x'_A$, evidentment) en un temps que mesurat per ell valdrà $t'_B - t'_A = \tau$ (*temps propi* de O'). El temps mesurat per O entre els mateixos esdeveniments serà $t_B - t_A = t$. És fàcil veure a partir de (2) que la relació entre t i τ val

$$t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En conseqüència, $t > \tau$ (*dilatació del temps de vida propi*). Per tant, de tots els temps mesurats entre dos esdeveniments A i B el més petit és el que correspon a l'observador que és present en els dos esdeveniments. En particular, es comprova que *el temps propi dels fotons és nul i des d'ells es viuen tots els punts espaciotemporals per on passen en un present etern*.

•**Els diferents temps propis entre dos esdeveniments.** Fins ara, no hem parlat de les característiques dels observadors per no complicar excessivament els nostres raonaments. Ímplicitament hem considerat que cada observador tenia un moviment tal que qualsevol cos no sotmès a cap força es mouria en relació a ell a velocitat constant: es tracta dels *observadors inercials*. Si un observador es mou amb velocitat constant en relació a un d'inercial, ell és també inercial. Podríem considerar que un observador inercial és aquell que, en absència gairebé de gravitació, es mou sense acceleració en relació al fons del cel dels estels fixos.

Suposem ara, com veiem a la figura següent, que l'observador inercial O es mogui entre A i B amb una línia d'univers rectilínia i que un altre observador O' ho faci a través de la línia d'univers ACB. Entre A i C O' s'allunya de O a una velocitat v i entre C i B s'hi acostarà a la mateixa velocitat. Per tant, O' variarà la seva velocitat en relació a O i no serà pas inercial globalment, malgrat que ho sigui entre A i C (O₁) i entre C i B (O₂) (en realitat el canvi de trajectòria s'hauria de fer suaument, per tal que l'acceleració en C no fos infinita).

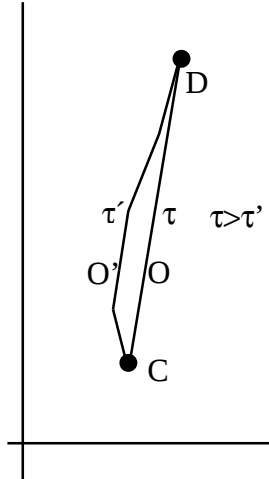


És immediat veure que la relació entre els temps propis τ i τ' de O i O', respectivament, la podem trobar a partir del raonament següent:

$$\tau = t_1 + t_2 = \frac{\tau_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{\tau_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow \tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Veiem, doncs, que $\tau > \tau'$. En general, es demostra que *entre totes les línies d'univers que hi ha entre dos esdeveniments C i D el temps propi més gran correspon a aquella trajectòria rectilínia d'un cos que no està sotmès a cap força i que es mou a velocitat constant en relació a un sistema inercial*, com es pot comprovar a la figura següent, que comentem a continuació.

•**Viatge al futur.** Imaginem una plataforma espacial que “flota” al fons del cosmos i que ve representada per la línia d’univers inercial O entre C i D.



Un astronauta O' surt de la plataforma des del punt C i després de viatjar torna a la plataforma a D. Què contemplarà O' quan torni? O' veurà que els habitants de la plataforma espacial hauran envellit en relació a ell, ja que $\tau > \tau'$, i haurà viatjat al futur dels habitants de la plataforma.

És també possible viatjar al passat? Es tracta d'una qüestió molt controvertida dins de la comunitat científica, ja que, per exemple, podríem tornar abans del nostre naixement i matar els nostres pares, amb la qual cosa nosaltres no hauríem pogut néixer! Sembla que les partícules quàntiques, potser, serien capaces de viatjar al passat, però no ho podrien fer pas els sistemes macroscòpics, com nosaltres, tret que poguessin existir universos paral·lels, la qual cosa és altament especulativa.

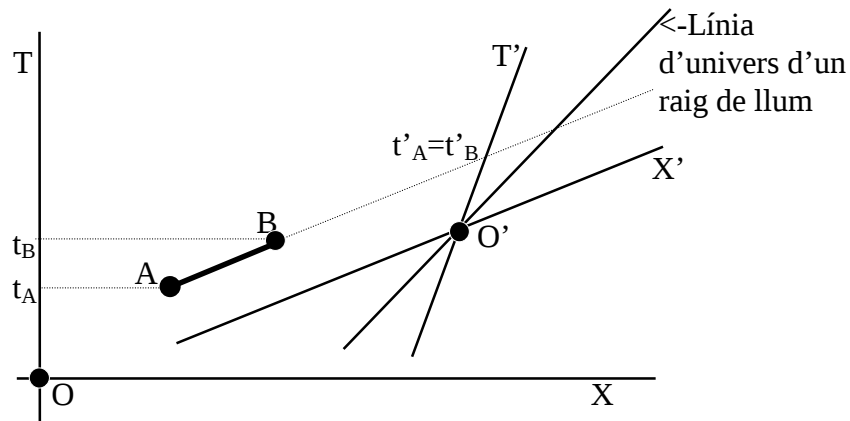
•**La velocitat de la llum és constant.** Si un punt material té la velocitat u' respecte a O' i la velocitat u en relació a O, quina és la relació entre u i u' ? Si dividim les equacions (1) i (2) anteriors, arribem a l'expressió

$$u = \frac{u' + v}{u' \cdot \frac{v}{c^2} + 1} \quad (3)$$

És fàcil veure que, si substituïm a (3) u' per c , trobem que $u=c$, la qual cosa és una comprovació que la velocitat de la llum al buit no depèn de l'observador.

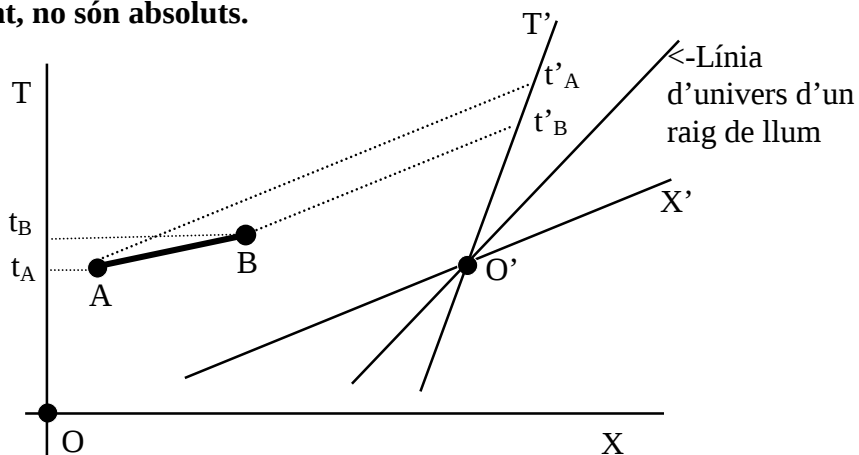
•**La simultaneïtat no és absoluta.** A partir de (2) és immediat comprovar que, si $t'_B - t'_A = 0$, no és obligatori que $t_B - t_A = 0$. En conseqüència, la simultaneïtat per a O' no té perquè ser-ho per a O. No hi ha un temps que marqui successivament el present de forma absoluta i el que ocorre ara no és universalment acceptat per tothom. Fixem-nos que els

dos esdeveniments anteriors, A i B, no poden estar connectats temporalment ($I > 0$), ja que la simultaneïtat en O' implicaria que l'interval $I < 0$ i arribaríem a una contradicció. Vegem ara de trobar la relativitat de la simultaneïtat gràficament:



A la figura de més amunt es comprova que els esdeveniments A i B connectats *espacialment* són simultanis per a O' , però no per a O .

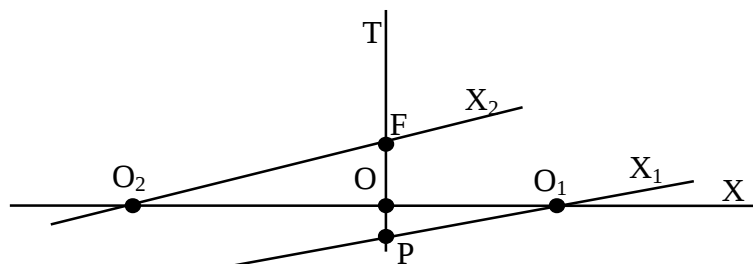
• El passat, el futur i la simultaneïtat, entre esdeveniments separats espacialment, no són absoluts.



A la figura anterior es comprova que als esdeveniments A i B separats *espacialment* es verifica $t_A < t_B$ i $t'_A > t'_B$. En conseqüència, O observa que B està en el futur de A, mentre que O' observa tot el contrari (és immediat trobar observadors que veurien A i B com a simultanis, d'acord al que hem comentat un xic abans). És fàcil comprovar que per als intervals temporals, amb pendent superior al dels intervals lluminosos, això no ocorre i

que en aquest cas el passat i el futur són absoluts per a tots els observadors: ningú pot veure que el fill d'en Jaume neixi abans que el seu pare!

REFLEXIONS AGOSARADES ENTORN DE LA REALITAT



A partir de la figura que precedeix podem fer les afirmacions següents:

- L'observador O veu els observadors O_1 i O_2 com a simultanis amb O.
- L'observador O_1 veu el passat P de O com a simultani amb O_1 .
- L'observador O_2 veu el futur F de O com a simultani amb O_2 .

A continuació ens endinsarem amb totes les precaucions possibles a la pregunta sobre “què és real?” Una primera aproximació consistiria en considerar que tot allò que és simultani amb el nostre present és real per a nosaltres. A partir d'aquesta afirmació, podem fixar aquestes premisses:

1) Des de O aquest observador considera reals els esdeveniments O_1 i O_2 , simultanis amb O.

2) Des de O_1 aquest observador considera real l'esdeveniment P simultani amb O_1 .

3) Des de O_2 aquest observador considera real l'esdeveniment F simultani amb O_2 .

Podem, tanmateix, estendre el qualificatiu de reals per a O als esdeveniments P i F que no són simultanis amb l'observador O i que pertanyen al passat i futur, respectivament, de O? Les reflexions que segueixen podrien confirmar-nos-ho:

Si per a l'observador O els esdeveniments dels observadors O_1 i O_2 són reals, *semblaria* que també ho haurien de ser per a O les afirmacions que aquells fan quan diuen que P i F, respectivament, són reals. Si així fos, la propietat sobre la realitat seria més general que la de la simultaneïtat. Generalitzant el raonament anterior hauríem de concloure que tot l'espai-temps és real, la qual cosa podria portar implícita d'alguna manera l'afirmació que tot està totalment determinat, ja que el passat inclouria el futur i el present i aquest el futur. El resultat és paradoxal, perquè com podria tenir el mateix estatus de real per a mi el que ja he viscut o que encara he de viure amb aquest meu present? A més, estaríem disposats a admetre un determinisme cec que anul·lés la nostra llibertat?

Prescindint de la correcció o no del raonament que ens ha portat a les paradoxals conclusions anteriors, el que aquell ens ha permès és situar-nos davant de preguntes que, potser, no ens hauríem fet mai. Aquí rau el seu valor autèntic. En aquest sentit, per què hem de considerar que el passat no té una existència real? Perquè no podem veure'l? Si aquesta fos la raó, es tractaria d'una raó ben pobre que es basaria en el prejudici que només seria real allò que podem observar a través de la realitat material espaciotemporal. Què passaria, però, si existís al món, a més, un nivell enllà del temps i de l'espai? Serien possibles també un futur i un passat amb un bri de realitat? Podria existir una llibertat allunyada dels condicionaments de l'espai temps? Per esbrinar tot l'anterior cal anar a la física quàntica.

ANOTACIONS

1- Les manifestacions corpusculars i ondulatòries de la matèria estan relacionades a través de l'equació de *De Broglie*, $\lambda=h/mv$, on h és la *constant de Planck*, λ n'és la longitud d'ona, m la massa de la partícula i v la seva velocitat. El microscopi electrònic aprofita aquesta propietat: els electrons que incideixen sobre la matèria, tenen un *moment lineal* $p=m.v$ més gran que el de la llum convencional i es manifesten com a ones amb una longitud d'ona molt més petita i, per tant, amb un gran poder de resolució.

2- L'anterior ens demostra que els resultats obtinguts no són fruit de la nostra ignorància sobre el camí que segueix un sistema quàntic quan no se'ns hagi manifestat. Si així fos, la probabilitat final de tenir una partícula d s'hauria de trobar, d'acord amb el càlcul de probabilitats, com a suma de les probabilitats degudes als diferents camins, $0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0.5 = 0.5$, la qual cosa és experimentalment falsa. Això ens ve a dir que les probabilitats que apareixen no ho fan com a causa d'una ignorància de tipus estadístic, sinó que són intrínseques a la *unió coherent* de les diferents *potencialitats* en què es troba el sistema quàntic. En el supòsit 3 anterior, quan un electró arribi a l'entrada de PH l'estat inicial del sistema quàntic no haurà variat, *perquè abans no s'ha manifestat en cap sentit*, i, en conseqüència, continuarà sent d !

3- Aquell principi té l'expressió matemàtica $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 4\pi$, on h és la *constant de Planck* i $p=m.v$ és el moment lineal de la partícula, amb m igual al valor de la seva massa i v igual a la seva velocitat. Δx i Δp_x són, respectivament, les indeterminacions en els valors manifestats de la posició i del moment lineal de la partícula en una direcció. Aquí podem veure fàcilment que si una magnitud està molt determinada, l'altra ho estarà poc.

4- Això es pot entendre fàcilment si tenim en compte que el valor de h és extraordinàriament petit. En efecte: per a un cos macroscòpic, com un cotxe, les indeterminacions de Δx i Δp_x seran prou grans per superar la desigualtat del *principi de Heisenberg*, però prou petites relativament als valors de x i p , perquè el concepte conegut de trajectòria es mantingui.

5- La realitat és tota una altra: la física quàntica permet literalment la creació d'una energia E des del buit durant un temps de vida t sempre que es verifiqui $E \cdot t \approx h / 4\pi$, on h és la *constant de Planck*. L'expressió anterior constitueix el *principi d'incertesa de l'energia*.