

Física del s. XX i filosofia

Arnau Riera.

Història de la Física, Universitat de Barcelona, Diagonal 647.

5 de Maig de 2004

Introducció

La física del segle XX ha canviat totalment la visió de la natura que teníem. Aquesta transformació no ha estat un simple canvi d'equacions, sinó quelcom molt més profund, arribant a alterar la concepció filosòfica del món.

Primer va ser la relativitat especial amb els treballs d'Einstein i Minkowski en que es va passar d'un espai i temps totalment independents entre sí, a un sol espai-temps que els contenia barrejats i inseparables. Anys més tard tornava a ser Einstein amb la relativitat general qui descrivia la gravetat com la curvatura d'aquest espai-temps que produeixen la massa i l'energia; les partícules es limiten a moure-s'hi lliurement (seguir-hi geodèsiques). Sí això havia canviat el concepte de temps i algunes postures filosòfiques eren descartades per la física, el pitjor encara havia d'arribar amb el desenvolupament de la mecànica quàntica. Qüestions com: quins són els límits del coneixement humà? la percepció que tenim del món influeix en aquest? té la natura elements intrínsecs d'aleatorietat de manera que no tot està predeterminat? semblaven tenir una resposta contrària al que sempre s'havia pensat.

La concepció clàssica

Segons la mentalitat clàssica i la de qualsevol persona que no conegui la teoria quàntica, descriure fins a última instància un sistema a un instant donat no és altra cosa que ser capaç de dir les posicions i velocitats (moments) de totes les partícules que el formen. A més a més si coneixem les interaccions que hi ha entre aquestes partícules, les lleis de la física ens permetran descriure'n la seva evolució en el temps. En el cas del sistema solar per exemple, una vegada aconseguim mesurar la posició i velocitats dels planetes entorn del sol, ja som capaços de descriure'n la trajectòria i predir així eclipsis, trànsits...

És cert que tenim unes limitacions tècniques que ens impediran mesurar amb tota la precisió que vulguem les velocitats i les posicions de les partícules. El que ens portarà a la impossibilitat de descriure la evolució de qualsevol sistema a temps arbitràriament grans. I com més complex sigui el sistema més gran serà aquesta impossibilitat (és el caos o indeterminisme clàssic). No obstant el fet que no puguem fer mesures d'infinita precisió no ens fa pensar que la posició i moment de cada partícula no estiguin perfectament definides i tinguin una realitat independentment del nostre coneixement sobre elles.

A finals del segle XIX i principis del XX però, tot aquest esquema va començar a presentar problemes. Van aparèixer uns quants fenòmens com els espectres atòmics, la radiació del cos negre, l'efecte fotoelèctric... que no eren explicats amb la mecànica i electrodinàmica clàssiques. La resposta a aquests problemes és el que seria la teoria quàntica, i ja a finals de la dècada dels anys 20 es formularia consistentment com la mecànica quàntica.

La nova mecànica quàntica: versió ortodoxa

En el seu origen, unes mateixes equacions i uns mateixos fets experimentals donaven encara una certa llibertat en la concepció de la teoria quàntica (el tercer eix de Holton). Així van aparèixer fonamentalment dues interpretacions d'aquesta: la interpretació ortodoxa o de Copenhaguen i la interpretació estadística.

La primera que és la més comuna dins la comunitat científica presenta diversos aspectes conflictius amb la concepció clàssica del món:

Interacció aparell de mesura sistema

Quan es tracten sistemes tan petits ja no és possible negligir la interacció que hi ha entre l'aparell de mesura amb que volem conèixer una propietat del nostre sistema i ell mateix. És a dir que la observació modifica l'objecte observat.

La dualitat ona-corpúscle

Segons la teoria quàntica un raig de llum pot comportar-se com un feix de partícules (fotons) o com una ona. En general es troba en un estat d'ambigüitat fins que no es realitzi una mesura. Si mesurem una propietat corpuscular, el fotó es comporta com una partícula; si n'estudiem una propietat ondulatoria ho fa com una ona. Que el fotó sigui una cosa o l'altra queda indefinit fins que no especifiquem el dispositiu experimental. Sembla que l'objecte d'estudi en aquest cas el fotó canviï segons l'observador.

Aquest comportament dual no només el verifiquen els fotons sinó la resta de partícules de la natura.

Principi d'incertesa.

El principi d'incertesa diu que el producte de les incerteses del moment i la posició com a mínim serà de l'ordre d' h . Això estableix la impossibilitat de conèixer perfectament el moment i la posició alhora, és a dir que si volem conèixer amb molta precisió la velocitat d'una partícula, haurem de renunciar a saber-ne la seva posició, quedant-nos aquesta totalment deslocalitzada.

La interpretació ortodoxa però encara és més estricta i estableix que només allò que el físic pot mesurar té significat real. Segons això no es que no puguem conèixer simultàniament el moment i posició d'una partícula sinó que aquests no poden estar definits. Això és sorprenent des del punt de vista clàssic, doncs un electró pel fet d'existir no es troba en un punt concret de l'espai i per tant no ens el podem imaginar situat a un lloc.

Desaparició de la trajectòria contínua.

Si les partícules no tenen en cada instant una posició i velocitats definides ja no té sentit parlar de trajectòria. Ja no és possible una descripció donant la posició de les partícules al llarg del temps. Les trajectòries deterministes deixen d'existir.

Pèrdua de causalitat

El principi de causalitat requereix que tot efecte sigui precedit d'una única causa. Així en mecànica clàssica conegudes les condicions inicials d'un sistema, la física ens permetia dir quina seria la seva evolució. Per exemple, el xoc entre dues boles de billar queda totalment determinat si coneixem les seves velocitats i posicions abans de l'impacte, és a dir sabrem exactament amb quina velocitat sortiran.

A escales atòmiques això ja no té perquè ser així. Quan un àtom es troba en un estat excitat es pot desexcitar en qualsevol dels seus estats d'inferior nivell energètic. La física només pot predir quina probabilitat hi ha que ho faci en cadascun d'ells però no pot assegurar en quin ho farà. La causalitat doncs, desapareix en el sentit que donada una mateixa condició inicial el seu futur no queda determinat. L'atzar és intrínsecament a la natura.

Caràcter no local.

Una mesura sobre una entitat quàntica pot influenciar instantàniament a una altra entitat allunyada d'ella. La mecànica quàntica doncs també és aquí xocant: com és possible que un esdeveniment en un punt de l'espai en pugui influenciar instantàniament un altre sense la necessitat que el medi entre aquests dos punts es vegi alterat?

Hem d'advertir però que la no localitat no vol dir que estiguem propagant informació més de pressa que la velocitat de la llum. L'aplicació d'aquesta propietat són els fenòmens de teletransportació quàntica.

El col·lapse de la funció d'ona

La funció d'ona és una funció que ens diu tota la informació possible d'un sistema (la paraula possible correspon a que segons el principi d'incertesa hi ha variables que no poden estar definides alhora). Així per exemple la funció d'ona d'un electró ens permet saber quina és la probabilitat de que l'electró es trobi en una posició o en una altra. Suposem ara que mesurem la posició d'aquest electró (mitjançant una pantalla fluorescent o qualsevol altre sistema). L'electró ens apareixerà en una única posició i per tant el passem a tenir totalment localitzat. La funció d'ona doncs ha canviat. Aquest canvi que experimenta la funció d'ona d'un sistema al aplicar sobre ell una mesura s'anomena col·lapse de la funció d'ona.

Realment desafia el sentit comú aquesta propietat que l'electró no ocupava una posició concreta en l'espai abans de la mesura i just després se'ns materialitza en un únic punt.

Una altra interpretació: L'estadística

Tal com hem vist, la interpretació de Copenhaguen té la pretensió de fer de la teoria una teoria completa i última. La interpretació estadística en canvi estableix que aquests noves propietats quàntiques són efectes col·lectius i la natura a nivell fonamental (individual) no té perquè ser així. Segons aquesta interpretació per exemple un electró movent-se per l'espai no tindria cap ona associada sinó que hauríem de tenir un feix d'electrons. Segons la interpretació estadística la mecànica quàntica no donaria cap informació sobre els processos individuals sinó sobre un conjunt infinit de processos elementals.

La tecnologia actual però està permetent posar de manifest efectes quàntics amb nombres molt petits de processos. Són d'aquest estil les noves tècniques de

teletransportació, la criptografia i computació quàntiques i altres. Sembla doncs que la interpretació estadística queda descartada.

Buscant una teoria realista

Per tot el que acabem d'enunciar veiem que la mecànica quàntica ens impedeix conèixer la natura a última instància, fa que no ens en puguem fer una imatge mental. Així va manifestar Einstein aquest sentiment d'imptència:

"Mentre que en la física clàssica era possible descriure el curs dels esdeveniments naturals com una evolució conforme a la causalitat, dins del marc de l'espai i el temps, presentant així models clars i precisos a la imaginació del físic, en canvi, en l'actualitat la física quàntica impedeix qualsevol representació d'aquest tipus i, en rigor, la fa completament impossible. Només permet teories basades en fórmules purament abstractes, desvirtuant la idea d'una evolució causal dels fenòmens atòmics i corpusculars; únicament subministra lleis de probabilitat considerant que aquestes lleis de probabilitat són de caràcter primari i constitueixen la essència de la realitat cognoscible; i no permeten que siguin explicades com a conseqüència d'una evolució causal que es produís a un nivell encara més profund del món físic."

Però el que ens planteja un problema filosòfic encara més gran és que segons la mecànica quàntica la natura en sí mateixa no està totalment definida i és quan mesuram, quan hi ha un subjecte observador, que fem que es defineixi (l'anomenat col·lapse de la funció d'ona). Aquesta visió que la observació modifica l'objecte observat i que la realitat és diferent segons si la mirem o no, és una conseqüència massa forta de la teoria per deixar tranquils físics i filòsofs.

No és estrany que molts físics hagin cregut que la descripció mecànic-quàntica de la natura resulta incompleta o aproximada, i per tant s'hagin posat en la recerca d'una teoria més completa.

Les teories realistes-locales són teories que intenten fer una descripció de la natura sense aquest subjectivisme de la mecànica quàntica ni la seva no localitat. Es basen en tres axiomes: realisme, inferència inductiva i separabilitat d'Einstein.

- El realisme és la doctrina que estableix que les regularitats apreciades en els fenòmens observats són causades per alguna realitat física, la existència de la qual és independent de l'observador.
- El segon postulat estableix que la inferència inductiva és una forma vàlida de raonament que pot aplicar-se lliurement. És a dir que si tinc una poma agafada i la deixo anar sé que caurà amb acceleració constant perquè sempre ho ha fet així. És aquesta premissa la que ens permet deduir conclusions legítimes dels experiments.
- La separabilitat o localitat d'Einstein estableix que cap tipus d'influència pot propagar-se més de pressa que la velocitat de la llum.

Les teories realistes locals i la mecànica quàntica no poden ser certes alhora, ja que les prediccions que fan unes i l'altra d'alguns resultats experimentals són diferents. Concretament es tracta de la desigualtat de Bell. És una desigualtat formulada per J. S. Bell en base als tres postulats anteriors. El més sorprenent és que en unes circumstàncies les prediccions de la mecànica quàntica la violen.

Segons els darrers experiments és la mecànica quàntica qui té la raó i per tant com a mínim una de les premisses de les teories realistes locals seria falsa. La comunitat científica obligada a conservar els principis de realisme i inferència inductiva no té altre remei que descartar el postulat de separabilitat i començar a acceptar que la natura en última instància és no local.

La teoria de Bohm

Aquesta és una teoria realista alternativa a la mecànica quàntica per tal d'escapar-se de la concepció probabilista i subjectivista d'aquesta. La teoria de Bohm descriu un procés físic real, concret i determinista i explica els comportaments dels electrons amb la mateixa precisió que la interpretació estàndard de la mecànica quàntica essent lliure dels embolics metafísics associats a aquesta. Així estipula que les posicions de les partícules tenen una naturalesa fàctica i estan sempre definides. També nega la superposició de diferents estats.

Seria una bona alternativa tot i que li falta una generalització a altes energies (relativista).

Com la mecànica quàntica, és una teoria no local, però després del que acabem de veure això és inevitable.

Conclusions

Mai cap altra teoria havia estat tan confirmada pels experiments ni alhora tan atacada per la situació incòmoda en que ens deixa en el terreny metafísic i filosòfic.

Tenim però altres indicis que ens fan creure que hi ha alguna cosa que potser podríem fer millor. És tracta de la generalització de la mecànica quàntica a altes energies, l'anomenada teoria quàntica de camps. En aquesta teoria ens apareixen per a processos molt senzills càlculs molt complexos que ens porten a una solució també molt simple. És per aquest motiu que diversos físics es plantegen si per passar d'una cosa senzilla a una altra que també ho és, no hi hauria una manera senzilla també de fer-ho en comptes de caure en una immensitat de càlculs.

Tot i que no hi ha un sol procés de la natura que no s'expliqui mitjançant la teoria quàntica de camps (deixant de banda la gravitació) i que els nivells de precisió entre prediccions teòriques i experiments són realment formidables, entenem les inquietuds d'aquells que s'hi senten incòmodes i segueixen buscant alguna altra teoria que no tingui aquests problemes.

No sabem si tindrem èxit i trobarem algun dia una teoria realista que ens expliqui la natura sense incerteses, aleatorietats... i de la qual la mecànica quàntica en sigui només una aproximació. El que sí que creiem és que aquesta recerca és bona per la física i és a partir de ments ambicioses que han après les coses de manera ortogonal a com se'ls hi han ensenyat i que no han tingut por a esfondrar (quan hagi estat necessari) principis del

tot estesos, que la ciència ha fet els progressos que ha fet. Potser aquestes noves teories seran les teories de cordes on totes les partícules elementals són simples cordes vibrant en espais d'onze dimensions.

Sigui com sigui, hem de considerar molt atractiu el que la física ens porti a debats d'aquesta profunditat. I ens adonem que la majoria de vegades no es fa prou èmfasi en els cursos de mecànica quàntica de les implicacions sorprenents que té aquesta. Passar de mecànica clàssica a la mecànica quàntica ortodoxa que s'ensenya a les universitats, no és aprendre una teoria més, sinó és canviar radicalment la manera en que has vist el món fins aleshores.

Bibliografia

[1] Niels Bohr, Atomic Physics and Human Knowledge. J.Wiley & Sons. New York, 1958.

[2] Abner Shimony, Realidad del mundo cuántico. Investigación y Ciencia, Temas 10. Barcelona, 1997.

[3] Bernard d'Espagnat, Teoría cuántica y realidad. Investigación y Ciencia, Temas 10. Barcelona, 1997.

[4] David Bohm, A suggested Interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. Physical Review, January 1952.

[5] Niels Bohr, Le postulat des quanta et le nouveau développement de l'atomistique. Électrons et photons, Rapports et discussions du cinquième conseil de physique. Paris 1927.