Alumne: Ferran Camps Carré
Tutora: Cristina Vila Muñoz

Viabilitat de la construcció d'un accelerador de protons a Catalunya

Presentació
El treball de recerca que he dut a terme durant aquests mesos tracta de la viabilitat tant econòmica com logística de la instal·lació d'un accelerador de protons destinat a la teràpia de protons (tractament contra el càncer) a Catalunya.
Vaig triar aquest tema ja que a 1r de batxillerat, a l'assignatura de Ciències per al Món Contemporani, ens van parlar dels acceleradors de partícules en general i, pel meu compte, vaig decidir fer una mica de recerca. De seguida vaig descobrir que era un tema molt interessant i del qual podia treure'n profit, així que vaig començar buscant informació general dels acceleradors perquè, a mesura que vaig anar avançant en el treball, pogués centrar-me en un aspecte més concret. Aquest aspecte va ser la teràpia de protons, un tractament per al càncer que vaig descobrir llegint alguns articles mèdics.

Metodologia
Pel que fa a la metodologia de treball i les fonts utilitzades, he intentat buscar nova informació cada setmana de manera constant i voldria remarcar la visita que vaig fer al Sincrotró ALBA, que em va servir com a motivació per tirar el treball endavant

així com de font d'informació molt útil. Durant la visita vaig assistir a la xerrada del Dr. Manuel Sabés sobre les aplicacions del Sincrotró. També he realitzat entrevistes amb la Dra. Marina Barraso o el Dr. Ignasi Ribas, he llegit el llibre *El Bosón de Higgs no te va a hacer la cama*, de Javier Santaolalla, i he consultat diverses pàgines web de les quals destacaria la del CERN, la del Sincrotró ALBA i la del Sincrotró australià. A mesura que he anat realitzant el treball m'he trobat amb tres grans dificultats, que han estat: trobar una hipòtesi sòlida, organitzar la immensa quantitat d'informació que hi ha i entendre alguns conceptes físics i tècnics una mica complexos.

Cos del treball

El meu treball es divideix en tres grans blocs: què és i com funciona un accelerador de partícules, què és la teràpia de protons i, finalment, la viabilitat logística i econòmica de construir l'accelerador a Catalunya.

En primer lloc, un accelerador de partícules és un conjunt d'instruments que, mitjançant el camp electromagnètic, propulsen partícules amb càrrega a velocitats properes a la de la llum amb dues finalitats diferents. La primera és fer col·lidir les partícules que circulen per l'accelerador entre elles per estudiar el resultat de la col·lisió des de l'àmbit de la física subatòmica. La segona és mantenir aquestes partícules circulant per aprofitar la llum que emeten en canviar de direcció des de l'àmbit de la fotònica.

El funcionament bàsic de l'accelerador es resumeix de la manera següent: primer de tot s'han d'obtenir les partícules que, com ja he dit, han de tenir càrrega (protons, electrons, ions, etc.). El procediment més comú és fer servir un àtom d'hidrogen i, per mitjà de dos elèctrodes (ànode i càtode) i una elevada diferència de potencial, trencar l'àtom en un protó i un electró. Un cop s'ha aconseguit el grup de partícules (*beam* en anglès) aquestes són injectades a un tub de buit, on es fa el buit per mitjà d'uns generadors. El buit ha de mantenir-se durant tot el recorregut. A continuació, un seguit d'imants (dipolars, quadrupolars, sextupolars...) que encerclen el tub per on circula el feix de partícules van canviant la seva càrrega de positiu a negatiu gràcies a un circuit elèctric de corrent altern. Aquest canvi constant del camp magnètic genera unes forces d'atracció i repulsió amb les partícules que són les que permeten que aquestes adquireixin unes velocitats tan elevades. A partir d'aquí el funcionament de l'accelerador dependrà de per què es farà servir. De l'accelerador n'aprofitarem la col·lisió entre partícules (col·lidors), ja que els feixos de partícules circulen en cercles concèntrics i, en un determinat punt de la trajectòria, xoquen i s'estudia el resultat amb una sèrie de detectors que donen informació sobre la naturalesa i les característiques del resultat de la col·lisió. Si de l'accelerador n'aprofitem la llum que les partícules emeten en canviar de direcció, hem de pensar que una circumferència és un polígon de molts costats, en cada costat hi ha un canvi

Sincrotró ALBA

de direcció i és en aquest punt que les partícules emeten una determinada radiació, anomenada llum o radiació sincrotró, que és interpretada per uns instruments anomenats línies de llum que permeten l'existència de les aplicacions d'aquest tipus de llum, la majoria d'elles relacionades amb l'àmbit de la medicina.
A causa de la gran quantitat d'informació que hi ha sobre els acceleradors, he cregut convenient classificar-los. Existeixen tres grans tipus d'acceleradors segons la trajectòria que segueixen les partícules accelerades. Aquestes tres varietats són, en primer lloc, els lineals (sovint abreujat *linac*) que tenen un recorregut rectilini i poden mesurar diversos quilòmetres, com és el cas del SLAC National Accelerator Laboratory ubicat a Stanford, EUA; o uns pocs metres, com trobem en els *linacs* mèdics. En segon lloc els circulars, que descriuen una circumferència en el seu recorregut, com el Sincrotró Australià situat a Melbourne, Austràlia. I, encara, els que tenen una morfologia espiral (anomenats ciclotrons), en què el feix de partícules comença al centre i va accelerant-se a mesura que descriu la trajectòria espiral. Un exemple és el Superconducting Ring Cyclotron (SRC), situat als afores de Tòquio, al Japó.
Per altra banda, podem separar-los segons allò que produeixen. Si s'estudia el resultat de la col·lisió entre partícules, s'anomenaran col·lidors, com per exemple el Large Hadron Collider (Gran Col·lidor d'Hadrons) que es troba al complex del CERN, a Suïs-

sa, on s'han dut a terme molts experiments de renom, el més destacat el descobriment del Bossó de Higgs. Si s'aprofita la llum que les partícules emeten en circular, s'anomenen sincrotrons, com és el cas del Sincrotró ALBA, situat a Cerdanyola del Vallès, Catalunya, i que ha dut a terme experiments com el SAXS o el MIRAS, que han permès el desenvolupament de noves tècniques de cristal·lografia, l'estudi de l'Alzheimer o la síntesi de pròtesis biodegradables.

Un cop explicats els acceleradors, cal explicar què és la teràpia de protons. Aquest tipus de teràpia és un tractament per a tumors localitzats i profunds, com és el cas dels tumors oculars, per exemple. Per dur-la a terme es necessita un ciclotró (accelerador amb morfologia espiral) de tipus sincrotró (n'aprofitem la radiació que emeten les partícules en circular). El concepte de funcionament és el mateix explicat anteriorment per als sincrotrons: els protons en sortir del ciclotró (fem servir aquest tipus d'accelerador perquè és més petit que els circulars i més eficient que els lineals) pateixen un canvi de direcció en què es produeix una emissió de llum de sincrotró. Les propietats d'aquesta radiació són úniques. La radiació és aplicada a la zona del tumor, afectant tant a les cèl·lules sanes com a les canceroses, com en la resta de tractaments radioterapèutics.
La diferència amb els altres mètodes és la manera que tenen les cèl·lules, mitjançant els seus enzims, de recuperar el mal causat. Les cèl·lules sanes es recuperen a la perfecció de la lesió i poden complir les funcions que els pertoquen. En canvi, les cèl·lules canceroses no són capaces de recuperar-se del dany, la qual cosa implica que no puguin dur a terme les seves funcions bàsiques, entre elles, reproduir-se; per tant, es frena el creixement del càncer.
És per això que la teràpia de protons és un tractament tan nou i punter, ja que és molt poc invasiva i molt precisa, la qual cosa implica l'aplicació d'una dosi mínima.
Pel que fa a la viabilitat de la instal·lació de l'accelerador, he observat diferents instal·lacions que duen a terme aquesta teràpia a Europa actualment, he estudiat la viabilitat econòmica en base a empreses americanes que es dediquen a lucrar-se del rendiment econòmic dels ciclotrons i, finalment, he establert uns criteris que m'han permès triar la ubicació final de l'accelerador.
Actualment hi ha prop d'una vintena de centres mèdics arreu d'Europa que fan servir la teràpia de protons per tractar el càncer. Jo he escollit les tres instal·lacions de més prestigi. En primer lloc, el Paul Scherrer Institute, situat a Suïssa, que compta amb dos pòrtics (llocs on es pot dur a terme el tractament) i que està molt centrat en la teràpia de tumors infantils). En segon lloc, el Dresden Proton Therapy Center, que compta amb un total de 8 pòrtics, tot i no estar tan aplicat en la teràpia infantil. En tercer i últim lloc, el Centre Protontherapy Orsay, que té tres pòrtics i que està força especialitzat en la teràpia infantil.

A nivell econòmic vull aclarir que no hi ha una gran quantitat d'informació pel que fa als sincrotrons i els col·lidors (acceleradors de grans magnituds), ja que estan destinats a la recerca i no pas a lucrar-se econòmicament. La meva proposta és un ciclotró, que té una escala molt més petita i que genera un benefici econòmic que, en el meu cas, aniria destinat a la recerca.
La inversió inicial del projecte seria d'uns 190 milions d'euros i es desglossaria en un ciclotró (90 milions d'euros), quatre mòduls de tractament (60 milions d'euros) i dos mòduls de recerca (40 milions d'euros). Cada tractament de teràpia de protons genera un benefici mitjà que es pot facturar en aproximadament 1.276 €, comptant que la meva proposta és de quatre mòduls de recerca, que cada tractament dura uns 30 minuts i que l'accelerador està actiu 6 dies a la setmana, 16 hores al dia durant 51 setmanes (la resta es preveuen per al manteniment); això deixa uns ingressos anuals bruts d'uns 50 milions d'euros. Cal comptar amb les despeses de manteniment, de consum energètic i, sobretot, del personal, que suposen uns 32 milions d'euros anuals. Finalment, obtenim uns ingressos anuals nets de 18 milions d'euros. Si recordem que la inversió inicial és de 190 milions d'euros, comptant que he inclòs 4 mòduls mèdics en el projecte, la inversió es recuperarà en uns 10 anys.
Un cop vist que la proposta és viable econòmicament, he establert sis criteris per determinar la localització idònia de l'accelerador.
Primer de tot, com que es tracta d'un cas oncològic i mèdic, l'entitat que es faria càrrec de la gestió de l'accelerador seria l'Institut Català d'Oncologia, que compta amb quatre zones d'influència que són Girona, l'Hospitalet de Llobregat, Badalona i Tarragona i Terres de l'Ebre.
A continuació, com que aquestes zones d'influència són grups d'hospitals, és necessari que aquests siguin de nivell 3, això vol dir que són hospitals que compten amb tecnologia punta i personal especialitzat. Trobem hospitals de nivell 3 a les zones de Girona, l'Hospitalet i Badalona.
També és un punt a favor si aquests hospitals ja compten amb acceleradors lineals (no com el que jo proposo), ja que el personal ja està familiaritzat amb aquest tipus d'instal·lacions. A la zona de Girona n'hi ha 3, a l'Hospitalet 5, a Badalona 3 i a les Terres de l'Ebre cap.
Aquestes instal·lacions han de tenir un abast màxim per optimitzar els desplaçaments. És per això que he considerat el nombre d'habitants de cada zona ICO. Badalona i l'Hospitalet són les zones amb una major població.
D'altra banda, un accelerador és una gran eina de recerca i per aquest motiu seria interessant que es trobés a prop de centres universitaris de medicina o relacionats. Actualment, l'Institut Català d'Oncologia compta amb convenis amb la Universitat Autònoma de Barcelona, la Universitat de Barcelona i la Universitat de Girona.

Per acabar, he volgut contemplar altres aspectes que poden contribuir a la decisió final. Alguns aspectes són la disponibilitat de terreny edificable, la connectivitat logística (infraestructures i mitjans de transport que connectin amb l'accelerador) o la infraestructura hotelera (per albergar pacients i familiars estrangers així com també professionals estrangers).
La ubicació proposada és o bé en un dels hospitals de la zona de Badalona o bé a la de l'Hospitalet, ja que aquestes compten amb els sis requisits esmentats anteriorment, cosa que implica que són zones idònies per a la instal·lació de l'accelerador.

Conclusions

Un cop fet aquest treball he arribat a les següents conclusions:
Els acceleradors de partícules són una potent eina de futur gràcies a les seves propietats úniques pel que fa al tractament de la matèria (col·lidors) o també en l'àmbit de la fotònica i la llum, com hem vist amb els sincrotrons.
La teràpia de protons és una tècnica de tractament de tumors molt més eficaç que les que s'utilitzen en una gran part dels casos actualment. Aquesta eficàcia és per la possibilitat de tractar el tumor directament d'una manera molt més innòcua, eficient i inofensiva. Cal afegir que alguns altres tipus d'acceleradors de partícules permeten realitzar espectrometries dels tumors que es poden obtenir a partir de la llum generada per aquestes partícules accelerades.
Catalunya és un país capdavanter en la investigació mèdica i especialment en els tractaments contra el càncer, alhora que disposa de la tecnologia i els coneixements per acollir un centre d'aquestes característiques.
Amb la recerca que he dut a terme pel que fa a la viabilitat econòmica i logística de l'accelerador de protons, puc concloure que, efectivament, seria factible la instal·lació d'aquest complex a Catalunya.
Encara que s'haurien de tenir en compte altres factors, com ara els polítics o els interessos industrials, que se m'escapen de les mans.

Bibliografia i webgrafia

Llibres:
SANTAOLALLA, J. El Bosón de Higgs no te va a hacer la cama. Ed. La Esfera de Los Libros. Madrid, 2016
Webs:
ACCELERADORS LINEALS HOSPITAL PROVINCIAL DE CASTELLÓ (17 de novembre 2017) .Informació sobre l'accelerador lineal de l'Hospital Provincial de Castelló. [Data de consulta: 5 de novembre 2017]. Disponible a: <http://hospitalprovincial.es/vl/institut-oncologic/radioterapia/externa> — ACCELERATORS FOR SOCIETY (29 de juny 2017). Informació sobre els tipus d'acceleradors. [Data de consulta: 27 d'abril 2017].

Disponible a: <http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21 > — AUSTRALIAN SYNCHROTRON (23 de març 2017). Informació estructural dels sincrotrons. [Data de consulta: 26 de juny 2017]. Disponible a: <http://www.synchrotron.org.au/about-us/our-facilities/accelerator-phy > — BUILD YOUR OWN PARTICLE ACCELERATOR (19 de novembre 2014). Elements bàsics per a la construcció d'un accelerador. [Data de consulta: 10 d'octubre 2017]. Disponible a: <http://www.scienceinschool.org/2014/issue30/accelerator > — CERN (30 de novembre 2017). Informació estructural dels col·lidors. [Data de consulta: 26 de febrer 2017]. Disponible a: <https://home.cern/ CDS> — CERN (25 de febrer 1994)> — Document de les aplicacions dels acceleradors col·lidors. [Data de consulta: 19 de novembre 2017]. Disponible a: <http://cds.cern.ch/record/260280/files/P00021907.pdf> — CERN DOCUMENT CENTER (17 de maig 2010). Document de costs d'instal·lació i ús del CERN. [Data de consulta: 25 de novembre 2017]. Disponible a: <http://cds.cern.ch/record/300873/files/?ln=bg> — CENTRO NACIONAL DE ACELERADORES (2 de novembre 2017). Informació sobre el cost dels actuals acceleradros situats a Espanya. [Data de consulta: 29 d'octubre 2017]. Disponible a: <http://cna.us.es/index.php/tarifas> — CPO (11 de maig 2017). Informació referent al Centre de teràpia de Protons d'Orsay. [Data de consulta: 29 d'octubre 2017]. Disponible a: <https://www.france-hadron.fr/en/nodes/icpo-orsay.html> — ECONOMIC FACTORS INVOLVED IN THE DESIGN OF A PROTON SYNCHROTRON (4 de juny 1978). Document dels costs d'un sincrotró de protons. [Data de consulta: 26 de novembre 2017]. Disponible a: <https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/Summer1968/0981.pdf> — INSTITUT CATALÀ D'ONCOLOGIA (16 de desembre 2016). Memòria de l'Institut Català d'Oncologia del 2016. [Data de consulta: 11 de novembre 2017]. Disponible a: <http://ico.gencat.cat/ca/l_institut/informacio-corporativa/memoria/> — MACHINE DESIGN (3 de febrer 2017). Diferències entre ciclotrons, acceleradors lineals i circulars. [Data de consulta: 18 de juliol 2017]. Disponible a: <http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-are-differences-between-linear-accelerators-cyclotrons-and-synchrotron> — PARTICLE ACCELERATORS AROUND THE WORLD (27 d'octubre 2017). Llistat d'acceleradors arreu del món. [Data de consulta: 12 de novembre 2017]. Disponible a: <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html> — PROTON THERAPY AT PSI (13 de març 2016). Informació sobre el centre de teràpia de protons PSI. [Data de consulta: 11 d'agost 2017]. Disponible a: <https://www.psi.ch/protontherapy/proton-therapy-at-psi> — UNIVERSITAT DE TERÀPIA DE PROTONS DRESDEN. Informació referent al centre de teràpia de protons de Dresden. [Data de consulta: 20 de setembre 2017]. Disponible a: <https://www.uniklinikum-dresden.de/de/das-klinikum/kliniken-polikliniken-institute/universitaets-protonen-therapie-dresden> — SINCROTRÓ ALBA (28 de novembre 2017). Informació sobre el sincrotró ALBA i les seves línies de llum. [Data de consulta: 30 de maig 2017]. Disponible a: ahttps://

www.cells.es/ca/> — SMALL REALLY IS BEAUTIFUL (19 d'octubre 2013). Informació referent a l'eficiència segons la mida de l'accelerador. [Data de consulta: 15 de novembre 2017]. Disponible a: <https://www.economist.com/news/science-and-technology/21588048-fundamental-physics-seems-have-insatiable-appetite-bigger-more> — SMALLER AND CHEAPER PARTICLE ACCELERATORS? (22 d'abril 2015). Informació econòmica referent als acceleradors de partícules. [Data de consulta: 25 de novembre 2017]. Disponible a: <https://phys.org/news/2015-04-smaller-cheaper-particle.html> — TAKING A CLOSER LOOK AT LHC (20 de setembre 2016). Informació sobre les cavitats de radiofreqüència. [Data de consulta: 22 de juliol 2017]. Disponible a: <http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.rf_cavities> — THE PARTICLE ADVENTURE (11 de gener 2015). Diferència entre acceleradors lineals i circulars. [Data de consulta: 26 de febrer 2017]. Disponible a: <http://www.particleadventure.org/lin_circ.html> — WIKIPEDIA (22 de novembre 2017). Informació global sobre acceleradors de partícules. [Data de consulta: 19 de febrer 2017]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator> — WIKIPEDIA (19 d'octubre 2017). Informació sobre el CERN. [Data de consulta: 18 de febrer 2017]. Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Organitzaci%C3%B3_Europea_per_a_la_Recerca_Nuclear> — WIKIPEDIA (22 de novembre 2017). Informació sobre el CERN. [Data de consulta: 26 de febrer 2017]. Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Organitzaci%C3%B3_Europea_per_a_la_Recerca_Nuclear> — WIKIPEDIA (30 de juliol 2017). Informació sobre els acceleradors lineals. [Data de consulta: 3 de març 2017]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator> — WIKIPEDIA (22 de novembre 2017). Informació sobre la radiació sincrotró. [Data de consulta: 26 de febrer 2017]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron_radiation> — WIKIPEDIA (18 de novembre 2017). Informació sobre els sincrotrons. [Data de consulta: 8 d'octubre 2017]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron>