

Applications des accélérateurs: les sources à neutrons de spallation

Les accélérateurs de protons de forte intensité récemment mis au point possèdent des caractéristiques qui les rendent attrayants comme sources de neutrons pour la recherche. Des protons d'énergie moyenne frappant des cibles formées d'éléments lourds engendrent aisément des neutrons et servent ainsi à en produire des faisceaux intenses utilisés dans une vaste gamme d'études fondamentales et appliquées de la matière condensée. Avec leurs neutrons froids, thermiques et épithermiques, les sources de neutrons de spallation ont déjà beaucoup apporté à la science et pour l'avenir elles offrent le moyen d'étendre et de compléter les recherches basées sur des réacteurs.

Dans cet article, Jack Carpenter, d'Argonne, décrit les conditions à remplir pour produire ces neutrons et comment on y parvient. Un second article, qui sera publié dans le prochain numéro du *Courrier CERN*, traitera de la vaste gamme des applications scientifiques de ces neutrons. Ensemble ils constituent un supplément important au numéro spécial de juillet/août 1995 du *Courrier CERN* – "Applications des accélérateurs".

Les accélérateurs comme sources de faisceaux de neutrons lents

Les neutrons ont constitué un outil essentiel de la science depuis leur découverte en 1932. Peu après, les scientifiques ont commencé à faire un usage croissant des neutrons lents pour étudier la structure et la dynami-



que de la matière condensée aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaire. En 1994, C.G. Shull et B.N. Brockhouse ont partagé le prix Nobel de physique pour leurs travaux d'avant-garde, menés dans les années 40 et 50, sur la mise au point des techniques de diffraction et de diffusion inélastique des neutrons auprès des sources de neutron dans les réacteurs nucléaires.

Dans une période récente, des accélérateurs de protons toujours plus puissants ont servi à alimenter des sources pulsées de neutrons de spallation dotées de capacités nouvelles pour les recherches sur la matière condensée.

Au-dessus de quelques centaines de MeV, l'énergie du proton est pour l'essentiel perdue dans des interactions avec les noyaux et non plus avec les électrons. Dans des cibles suffisamment profondes pour absorber totalement la cascade hadronique, s'établit un processus de production multiple, la spallation; typiquement 45 neutrons par proton incident émergent d'une cible épaisse de tantale pour une énergie des projectiles de 2,2 GeV.

La production neutronique est pratiquement proportionnelle à la puissance du faisceau de protons. Le rendement ainsi que les distributions de la produc-

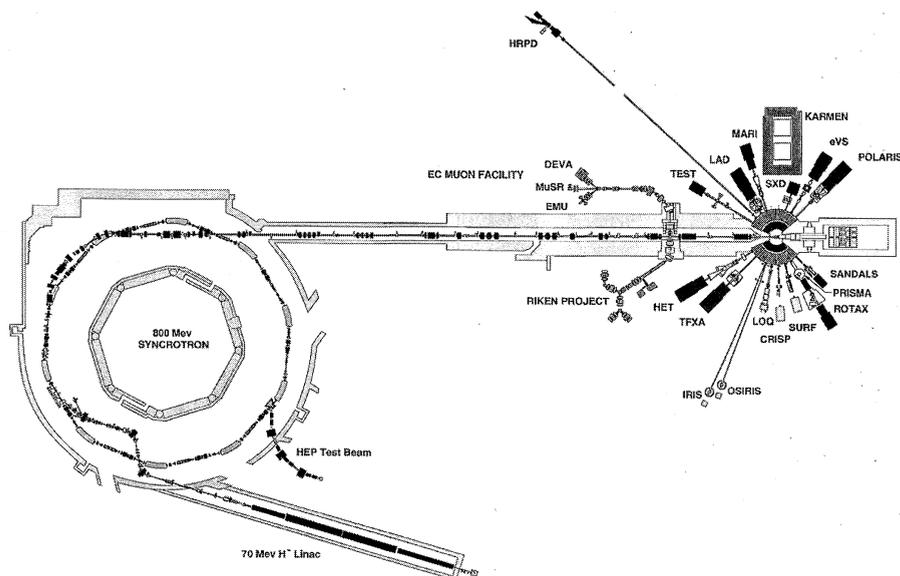
Le hall d'expérimentation d'ISIS, vu par un objectif "oeil de poisson" au laboratoire Rutherford Appleton du Royaume-Uni, c'est la première source pulsée à neutrons de spallation pour laquelle on a spécialement construit un grand accélérateur. ISIS, opérationnel depuis 1985, est de loin l'installation la plus intense, la mieux équipée et la plus productive de la génération nouvelle.

tion et de la densité de puissance des neutrons varient relativement peu avec l'énergie.

De ce fait, et compte tenu que les pertes de protons en cours d'accélération sont plus faciles à limiter si la puissance de faisceau souhaitée est le produit d'une énergie plus élevée par une intensité plus faible, le choix se porte vers des faisceaux pouvant atteindre quelques GeV dans les sources de neutrons à spallation alimentées par des protons.

On emploie des cibles de faible volume, quelques décimètres cubes, afin de produire les flux de neutrons les plus élevés possible. Ils sont pour la plupart engendrés par "évaporation" avec des énergies de 1 à 2 MeV. Toutefois une petite fraction des neutrons appartient à la "cascade" nucléaire de haute énergie produite par

Le synchrotron d'ISIS (à gauche) alimente un ensemble de postes d'expérimentation disposés en étoile (voir également dans la photographie ci-jointe).



anneau de stockage; le linac porte les ions à l'énergie finale ou peut être remplacé par un synchrotron à cyclage rapide (SCR) succédant à un linac d'énergie modeste. Toutes exploitent une extraction en une seule révolution, sur le premier ($h=1$) ou le second ($h=2$) harmoniques. Des configurations nouvelles permettent l'extraction en "multiplex" vers deux postes de cibles.

Une SIL peut fonctionner directement sur le faisceau présentant la macrostructure temporelle (cycle utile voisin de 10%) d'un accélérateur linéaire de protons d'énergie modeste: les ions H^- ne sont pas nécessaires. Actuellement la seule source de neutrons à impulsions longues en exploitation est celle du réacteur pulsé IBR-2 (pas d'accélérateur) de Doubna. Toutefois des plans de SIL avec accélérateur ont été élaborés; en outre, des postes de cibles SIL auxiliaires sont compatibles avec des installations SIC.

Avec l'amélioration de la technologie des accélérateurs dans les années 70, des machines à protons de haute intensité capables de produire des neutrons aisément et en abondance par des réactions de spallation ont été mises au point; c'est ainsi qu'est apparu un nouveau type de source de neutrons, la source à neutrons de spallation pulsée.

Elle a fait ses débuts avec les prototypes ZING-P et ZING-P' d'Argonne en 1973 et 1975. Des installations analogues étaient rapidement montées à Los Alamos en 1977, où la première fut appelée WNR; devenue LANSCE en 1985, elle est maintenant appelée Manuel Lujan Neutron Scattering Center (Centre de diffusion neutronique Manuel Lujan). La source KENS, au laboratoire japonais de haute énergie KEK a débuté en 1980. La machine actuelle IPNS d'Argonne a commencé à fonctionner en 1981. La première source pulsée de neutrons de spallation pour laquelle un grand accélérateur a été spécialement construit a été ISIS en Grande-Bretagne, en 1985. C'est de loin l'installation de la nouvelle génération la plus intense, la mieux équipée, la plus productive.

Une source à spallation pulsée/continue est en construction à l'Institut de recherche nucléaire de Troitsk, Russie, tandis qu'à l'Institut Paul

des collisions intranucléaires directes et exige des blindages épais.

Etant donné leur masse (1 uma), les neutrons qui s'accumulent à l'équilibre thermodynamique aux températures ordinaires – neutrons "thermiques" de 0,025 eV – ont aussi des longueurs d'ondes et des énergies comparables respectivement aux distances interatomiques et aux niveaux d'excitation caractéristiques de la matière condensée.

Leurs interactions magnétiques distinctives et leurs propriétés de diffusion nucléaire font de ces neutrons lents des sondes puissantes permettant de déterminer la structure et les mouvements des atomes et des agrégats de matière à l'échelle moléculaire. Des matériaux hydrogénés placés près de la source ralentissent – modèrent – les neutrons primaires jusqu'à des énergies utiles.

Il existe trois types de sources de spallation. Les sources à "impulsions courtes" (SIC) alimentées par des impulsions de protons inférieures à 1 ms, les sources à "impulsions longues" (SIL) basées sur des impulsions de protons de centaines de micro-secondes et les sources continues basées sur des faisceaux continus ou présentant une microstructure haute fréquence qui devient indécelable

après le passage dans le modérateur.

Les sources continues, tout comme les réacteurs de recherche, exigent de grands volumes modérateurs d'eau lourde. Les SIC sont les plus utilisées et n'emploient que de petits modérateurs (0,5 dm³) ayant une forte densité de protons, l'eau par exemple. Pour des considérations liées au modérateur et aux instruments à temps de vol, la fréquence des impulsions d'une SIC doit se situer entre 10 et 60 Hz. Ce type de source à spallation est le seul des trois à permettre une spectroscopie efficace, avec une excellente résolution, à l'aide de neutrons pouvant atteindre 10 eV. Le recours aux sources SIL est relativement récent.

On pensait naguère que les sources à spallation avaient pour avantage principal de produire des neutrons "épi-thermiques" (de plus de 0,025 eV). C'est effectivement le cas pour les SIC, mais avec les trois types de sources on peut en outre tirer parti efficacement des modérateurs cryogéniques pour produire également des faisceaux intenses de neutrons "froids".

Il existe des différences de détail dans les caractéristiques principales des trois types de sources à spallation. Les SIC utilisent des sources d'ions hydrogène négatifs (H^-), un linac et une injection avec épiluchage dans un

(SPS = Sources à impulsions courtes)

Tableau 1 – Sources pulsées de neutrons en service actuellement

Name, Type	Location	Beam Power, kW, Beam Energy, MeV	Startup Date
KENS, SPS	KEK, Japan	3.5, 500	1980
IPNS, SPS	Argonne, US	7.0, 450	1981
MLNSC, SPS	Los Alamos, US	50., 800	1985
ISIS, SPS	Rutherford Appleton Lab, UK	160., 800	1985
IBR-2, (long-pulsed reactor source)	FLNR, Dubna, Russia	2000. (total reactor power)	1984

Tableau 2 – Sources de neutrons de spallation en construction

Name, Type	Location	Beam Power, kW, Energy, MeV	Expected Startup Date
SINQ, Steady	Paul Scherrer Institut, Switzerland	1000., 590	1996
IN-06, SPS and Steady	Institute for Nuclear Research, Troitsk, Russia	300., 600	1996 possible

Tableau 3 – Propositions en cours d'étude et de développement

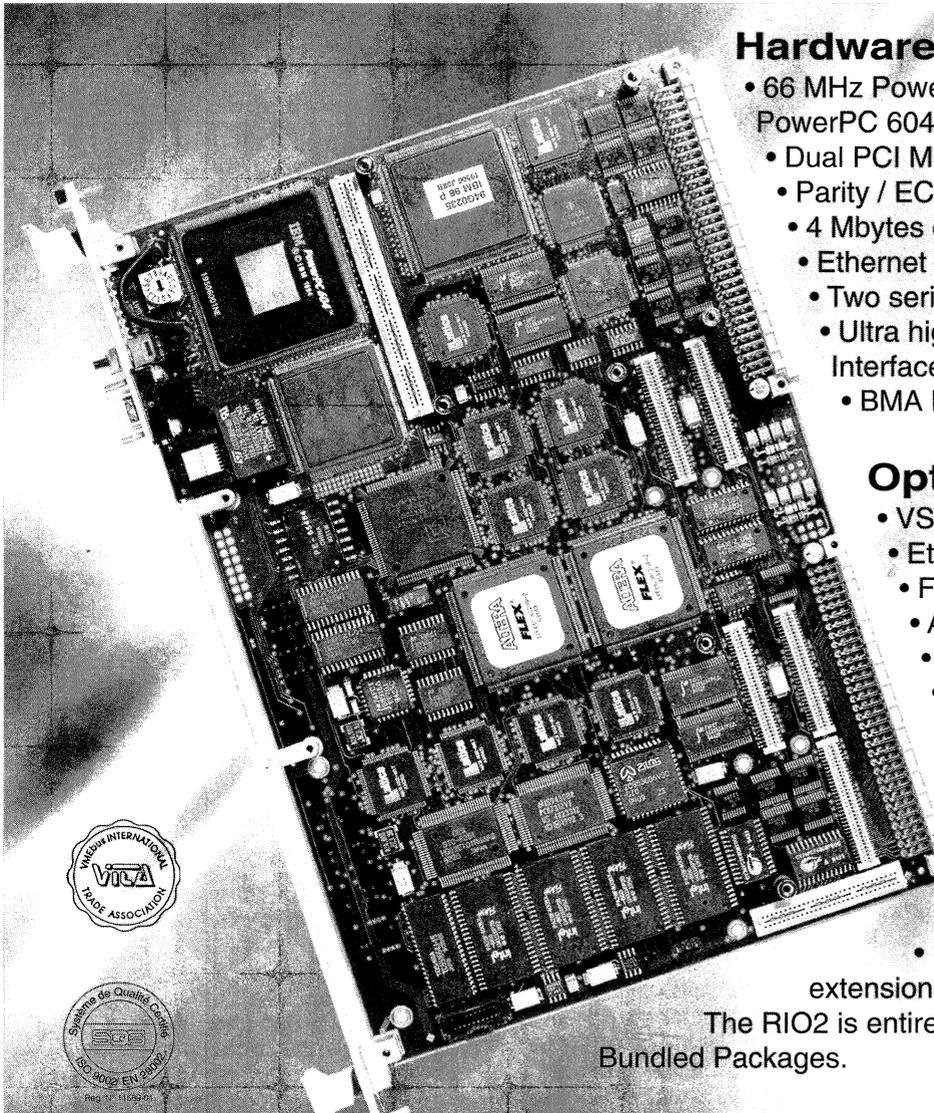
Name, Type	Location	Beam Power, MW, Beam Energy, GeV	Status
AUSTRON, SPS	Austria	0.2 → 0.4, 1.6	Documented, Reviewed Outline Report Complete
ESS, SPS	Europe	5.0, 1.34	
IPNS Upgrade, SPS	Argonne, US	1.0 (→ 5.0?) 2.0	Documented, Reviewed Concept Under Development
ISIS Target II, SPS	Rutherford Appleton Laboratory, UK	0.16 → 0.24, 0.8	
JHP n Arena, SPS	KEK, Japan	0.5 → 1.0, 2.0	Concept Established Concept Under Development
LPNS, LPS	Los Alamos, US	1.0, 0.8	
NGNS, SPS	Los Alamos, US	1.0 (→ 5.0?), 0.8	Documented, Reviewed Concept Under Development
ORSNS, SPS	Oak Ridge, US	1.0 (→ 5.0?), energy to be determined	
PSNS, SPS	Brookhaven, US	5.0, 3.6	Documented

CES PRESENTS:

The companion of the RTPC 8067:

RIO2 8060 - RIO2 8061

VME PowerPC Real-Time Platform for PCI Mezzanines (PMC)



Hardware

- 66 MHz PowerPC 603 (RIO2 8060) or 100 MHz PowerPC 604 (RIO2 8061)
- Dual PCI Mezzanine slots
- Parity / ECC on the entire memory
- 4 Mbytes of Flash EPROM
- Ethernet with 10baseT
- Two serial interface ports
- Ultra high speed VME Master / Slave Interface
- BMA logic with chained block transfers

Optional PMCs

- VSB VSB 8464
- Ethernet ETH 8477
- FDDI FDDI 8466
- ATM ATM 8468
- FDL FDL 8440
- Extension module for 2 or 4 additional PMCs PEB 6406

Software

- PPCMON: Powerful plug & play monitor with PCI and PMC commands
- Embedded Lynx with CES extensions and drivers.

The RIO2 is entirely compatible with RTPC Lynx Bundled Packages.

Typical Application

- Accelerators Controls
- Development platform for custom PMCs in new generation DAQs

Contact CES directly or visit us on WWW at http://www.ces.ch/CES_info/Welcome.html

Your Real-Time Partner

For any additional information about this product or our complete VIC, VME, CAMAC and FASTBUS line, do not hesitate to contact us.

CES Geneva, Switzerland Tel: +41-22 792 57 45 Fax: +41-22 792 57 48 EMail: ces@lancy.ces.ch
CES.D Germany Tel: +49-60 55 4023 Fax: +49-60 55 82 210
CES Creative Electronic Systems SA, 70 Route du Pont-Butin, P.O. Box 107
CH-1213 PETIT-LANCY 1 SWITZERLAND

CES
CREATIVE ELECTRONIC SYSTEMS

Scherrer en Suisse, la source à spallation continue SINQ est presque terminée. Un certain nombre d'études de machines nouvelles ont été menées au fil des ans, parmi lesquelles ING au Canada a eu beaucoup d'influence (1965); puis sont venues IPNS-II à Argonne, SNQ en Allemagne et KENS-II au Japon, aucune d'entre elles n'a abouti, leur étude a toutefois apporté des connaissances importantes et une expérience de la conception.

Maintenant la commission de la Communauté européenne soutient l'étude d'une nouvelle installation, la source de spallation européenne (SSE) (mars 1994, page 15) basée sur un accélérateur de protons pulsé fournissant une puissance de faisceau moyenne de 5 MW, 30 fois plus qu'ISIS. En Autriche une autre étude d'une installation polyvalente nouvelle, AUSTRON, un peu plus puissante qu'ISIS, vient d'être terminée. Los Alamos vient de lancer l'étude d'une source de neutrons à impulsions longues. D'autres études sont en cours à Argonne, Brookhaven et Oak Ridge aux Etats-Unis et au KEK dans le cadre du projet japonais Hadron. Certains de ces projets permettraient d'augmenter ultérieurement la puissance.

Sur la base de leurs études techniques, les concepteurs s'accordent à admettre qu'une source de 1 MW de l'un quelconque des trois types peut actuellement être construite. Cependant le consensus n'est plus aussi net au sujet de la configuration des systèmes de l'accélérateur la mieux adaptée. Les cibles pour une source de 1 MW ne sont pas techniquement difficiles à réaliser, mais l'expérience pratique montre que les cibles solides ne durent que quelques mois. Le matériau-cible le plus productif (uranium) et le modérateur le plus efficace (méthane solide) ont des inconvénients au niveau de 1 MW.

Des questions telles que les méfaits des radiations et la catalyse de la corrosion par les radiations, par exemple, demandent à être étudiées pour des cibles utilisées à plus haute puissance. Il est possible d'arrêter un faisceau, quelle que soit sa puissance, s'il est suffisamment dispersé.

Toutefois cette dispersion doit être limitée si l'on veut préserver les

aspects attrayants liés à la compacité des sources à spallation. A 5 MW, les flux moyens de neutrons thermiques des sources à spallation seront comparables à ceux des réacteurs de recherche de flux les plus élevés: 10^{15} n cm^2 s^{-1} . Les flux instantanés pourraient être plus élevés de deux ordres de grandeur.

L'instrumentation des applications présente certaines particularités. Les sources de neutrons lents destinées à la recherche, de l'un ou l'autre type, peuvent alimenter des dizaines d'instruments, tous fonctionnant indépendamment et simultanément.

Typiquement un instrument de diffusion neutronique coûte de 1 à 5 millions de dollars et reste en place sans grandes modifications une dizaine d'années.

Habituellement les expériences durent quelques jours; elles comprennent de nombreuses sessions durant des minutes ou des heures qui correspondent à des modifications systématiques des variables thermodynamiques ou des compositions; elles sont menées par un ou par seulement quelques scientifiques.

Chacune des sources actuelles permet d'effectuer des centaines d'expériences individuelles, des centaines de scientifiques visiteurs se présentant selon un calendrier bien minuté. Ces nombres deviendront des milliers dans n'importe laquelle des sources nouvellement proposées. Les sources sont exploitées 24 h par jour sur des cycles longs de plusieurs semaines. Mais leur fonctionnement doit être extrêmement fiable. Toute interruption supérieure à quelques heures entraîne habituellement l'échec d'une expérience. Donc, pour servir convenablement la communauté des utilisateurs, la fiabilité de l'exploitation doit dépasser les 90%. Ce sont les chiffres que l'on atteint actuellement.

Ce schéma de sessions courtes et de rotation rapide ressemble à celui des sources de lumière synchrotron qui servent pour des programmes d'expérimentation analogues. Il est donc très différent de celui des expériences en physique des particules caractérisé par ses longs préparatifs et la nécessité de sessions longues.

J. Carpenter

Plus petit qu'un quark?

Presqu'un an après l'annonce officielle historique de la découverte du sixième quark, le t, par les équipes d'expérimentateurs au collisionneur proton-antiproton Tévatron du laboratoire Fermi, des spéculations se font jour selon lesquelles les données de l'expérience CDF pourraient suggérer un nouveau type de propriétés des particules, peut-être dû à une couche encore plus profonde dans la sous-structure de l'Univers, à des particules encore plus petites que les quarks et les gluons. Compte rendu dans le prochain numéro.