

RADIAÇÃO DE SINCROTRON: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES EM ESTUDOS ESTRUTURAIIS E DE TRANSFORMAÇÕES DE FASE EM MATERIAIS

ALDO CRAIEVICH

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

RESUMO

Apresentam-se as características principais que fazem a radiação de sincrotron singularmente útil para pesquisas de estrutura atômica e transições de fase de materiais. Descrevem-se algumas aplicações específicas em ligas, vidros e sólidos moleculares.

RADIAÇÃO DE SINCROTRON

Os físicos de altas energias, que estudam as características das partículas elementares subatômicas, começaram a construir e usar, a partir da década de 60, anéis de armazenamento de elétrons (ou pósitrons) nas suas pesquisas. Nesses anéis podem-se obter correntes e letrônicas bastante maiores do que em aceleradores lineares. Nesse tipo de experiências produzem-se colisões entre partículas (por exemplo elétron-pósitron) e estudam-se as características dos produtos de colisão. A medida que vão se completando experiências numa certa faixa de energia das partículas surge, invariavelmente, a necessidade de se dispor de anéis de energia cada vez maiores, (os primeiros foram de algumas centenas de MeV e os que se constroem atualmente são de dezenas de GeV).

Os anéis de armazenamento estão compostos por seções retas (onde se produzem as colisões) e seções curvas nas quais eletro-ímãs mantêm os elétrons numa trajetória circular. Para os físicos de altas energias, a parte circular serve apenas para se obter uma trajetória fechada. Nas seções retas incluem-se ímãs quadrupolares e hexapolares, afim de focalizar o feixe eletrônico. A trajetória dos elétrons está confinada num tubo em ultra alto vácuo (aproximadamente 10^{-10} torr), aos efeitos de manter o feixe por longo tempo sem perdas por espalhamento molecular.

Nos ímãs dipolares, o elétron sofre uma aceleração (centrípeta) e, consequentemente, ele gera ondas eletromagnéticas. Nos anéis de armazenamento a velocidade dos elétrons é praticamente igual à velocidade da luz no vácuo ($v=3,10^{10}$ cm/s) e, nessas condições, a eletrodinâmica relativista prediz uma radiação confinada num cone bastante estreito centrado na tangente à trajetória curva, traçada a partir da posição instantânea do elétron. Isto faz que se tenha radiação (que chamaremos de sincrotron), essencialmente no plano da órbita com uma divergência muito pequena. A radiação de sincrotron tem ainda uma característica adicional interessante: ela está polarizada no plano da órbita.

Devido à radiação de sincrotron, o elétron

perde energia após a passagem por cada um dos ímãs defletores. Essa perda deve ser repostada para o feixe conservar a sua energia aproximadamente constante durante todo o seu percurso no anel. Isso se consegue com uma cavidade de radio-freqüência, inserida numa das seções retas, que faz recuperar ao elétron a energia perdida em cada volta. O uso desta cavidade produz um feixe descontínuo, agrupando-se os elétrons em pacotes de dimensões reduzidas. Dependendo da freqüência da cavidade pode-se ter um anel com um ou vários pacotes de elétrons.

Para os pesquisadores em física de altas energias a radiação de sincrotron é um subproduto inútil que produz somente efeitos secundários indesejáveis. No fim da década de 60, começou-se a utilizar essa radiação para estudos de física atômica, molecular e de sólidos. Nos primeiros anos, os usuários a utilizaram de modo parasita, simplesmente fazendo uma janela no anel e utilizando o subproduto das experiências de altas energias. Na década do ano 70, os anéis de armazenamento começaram a ser partilhados e, na atualidade, já existem vários que são dedicados, ou seja, otimizados e utilizados exclusivamente como fontes de radiação de sincrotron.

O espectro da radiação de sincrotron tem várias características interessantes. Para se avaliar as suas qualidades, uma comparação com as fontes convencionais na região dos raios X e ultravioleta, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre fontes de radiação.

CARACTERÍSTICA	TUBOS CONVENCIONAIS	RADIAÇÃO SINCROTRON SEM WIGGLERS
INTENSIDADE (UNID. REL.) ESPECTRO BRANCO	1	$\sim 10^6$
INTENSIDADE (UNID. REL.) LINHAS CARACTERÍSTICAS	$\sim 10^3$	-
COLIMAÇÃO	não	sim
POLARIZAÇÃO	não	sim
ESTRUTURA TEMPORAL	não	sim

Esquemas de espectros de emissão de radiação síncrotron são apresentados na Fig. 1, para dois anéis de armazenamento dos quais se utilizam radiação ultravioleta (A) e raios X (B). O comprimento de onda λ_c característico do espectro (λ_c divide o espectro em duas partes de igual área) está relacionado com a intensidade do campo magnético B e a energia dos elétrons E por [1]

$$\lambda_c [\text{\AA}] = 18,6/E^2 [\text{GeV}^2] B [\text{Tesla}]$$

o valor máximo de B que pode-se obter com um eletro ímã num anel de armazenamento é aproximadamente 1,8 Tesla. Sabendo que se tem um número apreciável de fótons até $\lambda_{\min} \approx \lambda_c/3$ vemos que

$$\lambda_{\min} [\text{\AA}] \approx 3,4/(E[\text{GeV}])^2$$

Isso implica que, se queremos ter raios X com $\lambda = 1,5 \text{\AA}$ (comprimento de onda utilizado geralmente em cristalografia com tubos convencionais), devemos utilizar um anel com energia eletrônica de pelo menos 1,5 GeV.

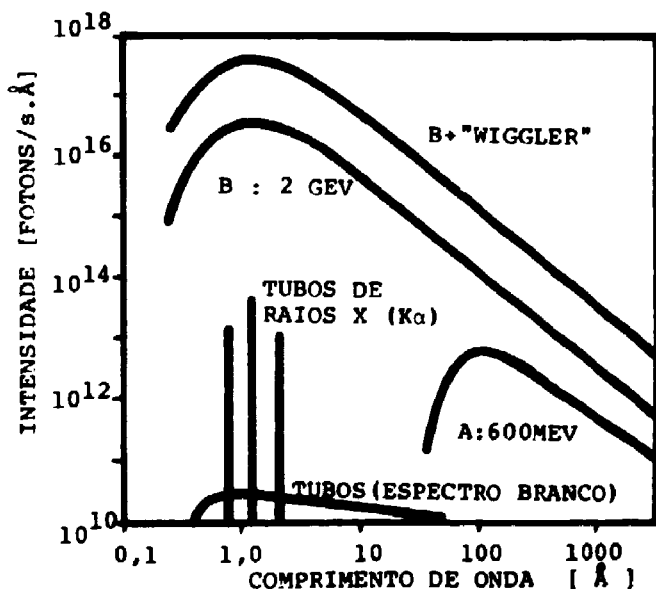


Figura 1. Esquema comparativo das intensidades de radiação produzidas por diversas fontes.

Os anéis de armazenamento permitem a instalação de um grande número de linhas de raios X ou luz ultravioleta, como se pode apreciar no Apêndice (anel de Brookhaven, em construção) e, em cada uma das linhas, podem-se instalar várias estações de pesquisas que envolvem as diversas técnicas experimentais (difração, espalhamento, absorção, fotoemissão, radiografia, microlitografia, etc.)

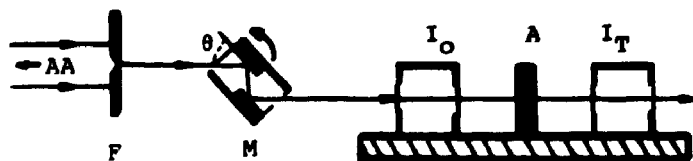


Figura 2. Arranjo experimental para estudos por espectroscopia de absorção (EXAFS). AA: anel de armazenamento; F: fenda; M: monocromador "channel cut" (θ : ângulo de Bragg); I_0 e I_T : câmaras de ionização que medem as intensidades incidente e transmitida, respectivamente; A: amostra.

As características da radiação indicadas na tabela 1, no referente à polarização e estrutura temporal, permitem aplicações interessantes da radiação síncrotron, cujas técnicas associadas estão em desenvolvimento. Neste trabalho exporemos somente aplicações que precisam de a) espectro de comprimento de onda variável com alta intensidade e b) espectro de comprimento de onda fixo com alta intensidade. Entre as técnicas experimentais que necessitam de um espectro contínuo, a mais utilizada é a de absorção ou EXAFS ("Extended X-Ray Absorption Fine Structure"). Entre as técnicas que precisam de feixe de alta intensidade com comprimentos de onda fixos, as mais comuns no presente, são as de difração e espalhamento. As três técnicas citadas são utilizadas para o estudo de estrutura atômica, ordenamento atômico a curta ou média distância e variações associadas a transformações estruturais nos sólidos.

Neste tipo de experiências de absorção (vide Fig. 2), deve-se utilizar um feixe incidente de fótons de energia variável ($E = hc/\lambda$ onde h é a constante de Planck e c a velocidade da luz no vácuo). Para determinar o coeficiente de absorção mede-se a intensidade incidente $I_0(E)$ e a transmitida $I_T(E)$, as quais estão relacionadas pela lei de Lambert

$$I_T = I_0 e^{-\mu(E) \rho d}$$

onde d é a espessura da amostra e ρ a densidade média do material. O coeficiente de absorção $\mu(E) = (1/\rho d) \ln(I_0/I_T)$, apresenta descontinuidades características de cada um dos átomos absorventes e, para energias acima das arestas de absorção, observam-se oscilações que estão associadas à ordem a curto alcance ao redor do átomo absorvente [2]. Os parâmetros que podem ser obtidos de uma experiência de EXAFS são: a) distância média de primeiros vizinhos e, em certos casos, de segundos e terceiros vizinhos a partir de cada um dos elementos atômicos do material, b) número de coordenação (número médio de átomos em cada uma das camadas vizinhas), e c) fatores de Debye-Waller associados às desordens atômicas, estática e dinâmica, correspondentes às estruturas locais ao redor de cada tipo de átomo.

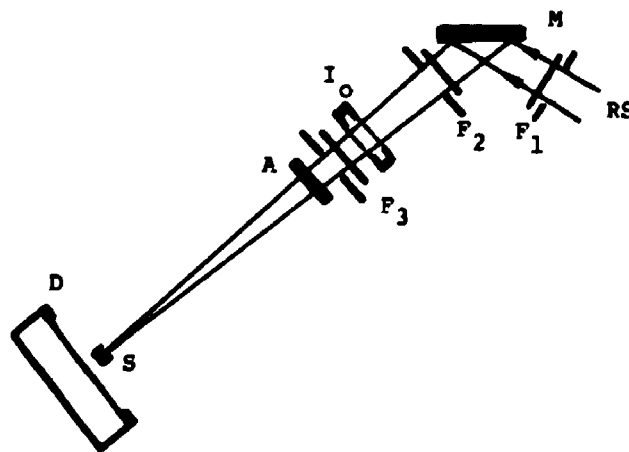


Figura 3. Montagem experimental para estudos de espalhamento de raios X a baixos ângulos. RS: radiação síncrotron (branca); F_1 , F_2 e F_3 : fendas que limitam o feixe e reduzem o espalhamento parasita; M: cristal monocromador curvado (focalizante); I_0 : câmara de ionização para monitorar a intensidade do feixe incidente; A: amostra; S: "beam stop"; D: detector do espalhamento sensível à posição.

Ligas. Estudos mediante EXAFS com radiação de sincrotron, de ligas metálicas diluídas [3,4], permitiram estabelecer a estrutura atômica na vizinhança das impurezas. O parâmetro relevante nestes estudos é a distância b dos átomos de impureza aos átomos primeiros vizinhos da matriz. Os estudos convencionais mediante difração de raios X da variação de parâmetro de rede de diversas ligas, associando um modelo elástico contínuo para o átomo de impureza, permitem a avaliação da diferença δb entre a distância b e a distância b_0 correspondente ao metal da matriz puro. As experiências de EXAFS permitem a determinação de b sem necessidade de se utilizar o modelo elástico.

Os resultados obtidos para δb mediante EXAFS em ligas Cu-Ag e Mg-Zn (onde o símbolo - indica o elemento da matriz) mostram valores muito diferentes utilizando-se ambas as técnicas. Para Cu-Ag achou-se δb (EXAFS)/ δb (difração) = 1,6 e para Mg-Zn δb (EXAFS)/ δb (difração) = 3,4. A diferença entre os resultados se deve à necessária aproximação que se introduz com o modelo elástico [4]. A análise sistemática das diferenças entre os valores de δb para diversos tipos de átomos de diferente valência utilizando-se ambos métodos, fornece uma informação importante sobre o grau de afastamento do sistema em estudo do modelo elástico e, consequentemente, contribui ao estudo das características das forças de interação atômica.

Asevolução das zonas de Guinier-Preston em ligas metálicas (Al-Cu, Al-Zn, Al-Ag, Pt-Au, etc.), foram estudadas por diversas técnicas de difração e espalhamento de raios X a baixos ângulos. Estas técnicas fornecem informações sobre a forma e tamanho das zonas de segregação (espalhamento a baixo ângulo) e informações apenas qualitativas (como vimos na seção precedente) sobre a distância entre átomos vizinhos nas zonas. Recentes trabalhos de EXAFS em ligas Al-Cu e Al-Zn [3,5] permitiram a determinação da distância de próximos vizinhos e também número de coordenação. Isto permitiu deduzir por primeira vez, a estrutura das zonas de Guinier-Preston, incluindo a composição química delas. Isso equivale a dizer que a técnica de EXAFS atua como uma sonda de análise a nível quase atômico, pois pode-se analisar zonas compostas até por camadas monoatômicas.

Catalizadores. Progressos recentes da técnica de EXAFS, mediante o modo dispersivo [6] permitem obter espectros em tempos da ordem de 10^{-3} s. Isto possibilita a realização de estudos de fenômenos cinéticos, associados a transformações estruturais. A alta intensidade da radiação de sincrotron, permite também o estudo estrutural de superfícies. Neste caso, quando se trata de átomos adsorvidos, a fração de volume de amostra ocupada por eles é extremamente baixa. Mesmo nessas condições, podem-se obter espectros de EXAFS com radiação de sincrotron em tempos razoáveis (alguns segundos).

Neste tipo de estudo de superfície, os sistemas que estão recebendo maior atenção são os catalizadores utilizados na indústria do petróleo. Esses materiais são mantidos a pressão e temperaturas variáveis, e pode-se determinar mediante EXAFS dispersivo as mudanças estruturais e, também, correlacioná-las com o decaimento da atividade catalítica. A importância deste tipo de estudos sob o ponto de vista básico e industrial é evidente [7].

Vidros Metálicos. Recentemente vem adquirindo importância industrial a produção e estudo de vidros metálicos, os quais são ligas compostas por vários elementos, resfriadas rapidamente a partir da fase líquida. Os estudos estruturais por difração de raios X permitem obter uma função de distribuição atômica radial, $f(r)$, que é uma distribuição média dos centros atômicos, tomando-se como origem todos os tipos de átomos. Desta função se

obtem as distâncias médias de próximos vizinhos e os números médios de coordenação.

Os estudos de EXAFS permitem a determinação das funções parciais de distribuição atômica radial $f_i(r)$ associadas a cada um dos átomos i da liga vítrea. A determinação independente de cada função $f_i(r)$, isoladamente, resulta indispensável para o estabelecimento dos modelos de estrutura atômica satisfatórios para os vidros metálicos.

ESPALHAMENTO E DIFRAÇÃO A BAIXOS ÂNGULOS

Neste tipo de experiências utiliza-se um feixe monocromático de comprimento de onda fixo. O uso da radiação de sincrotron mostrou-se importante porque diminui os tempos requeridos para obter diagramas e estes podem ser obtidos sem aberrações. Isto significa que, nas montagens com radiação de sincrotron, podem ser utilizados feixes de seção pontiforme mesmo em estudos de espalhamento (como mostrado na Fig. 3), o que evita as necessárias correções de diagramas obtidos mediante feixes de seção linear. Este tipo de geometria precisa ser utilizado na quase totalidade dos estudos de espalhamento com fontes de radiação convencionais, devido à baixa intensidade disponível nestes aparelhos.

As pesquisas por difração que requerem numerosos diagramas (por exemplo para uma caracterização estrutural de diagramas de equilíbrio), podem ser realizadas em tempos razoáveis com radiação de sincrotron.

Finalmente mencionaremos os estudos de espalhamento a baixo ângulo por polímeros parcialmente cristalizados. Nestes sistemas a intensidade de espalhamento (proporcional ao quadrado da diferença de densidade eletrônica entre as partes cristalina e amorfa) é extremamente baixa e somente podem-se obter resultados de qualidade aceitável utilizando-se radiação de sincrotron.

Desordem molecular em parafinas. As parafinas $C_{n+2}H_{2n+2}$ apresentam, com algumas exceções, diversas modificações em estado sólido. A baixas temperaturas, as moléculas se empacotam em camadas, com os eixos longos paralelos entre si, sem desordens associadas ao deslocamento ou rotação molecular e sem apresentar um número importante de defeitos intra-moleculares ("kinks"). Entre essas fases que chamamos cristalinas e o líquido, apresentam-se fases caracterizadas por uma importante desordem molecular; as amplitudes dos movimentos longitudinais de libração são elevadas. Em particular observa-se em certas parafinas a rotação quase livre das moléculas.

Foram realizados estudos com radiação de sincrotron por difração de raios X a baixos ângulos de parafinas com n ímpar em função da temperatura (mediante o uso de uma cela de temperatura variável) e com feixe de seção pontiforme [9]. Os resultados obtidos permitiram a determinação da variação da amplitude dos deslocamentos longitudinais e da concentração de defeitos com a temperatura, de todas as parafinas estudadas. O conhecimento das concentrações de "kinks" na fase rotatória permitiu prever, por extrapolação para n grandes, a concentração esperada em polímeros e o tamanho mínimo de uma molécula de parafina necessária para a estabilidade mecânica dos "kinks". A correlação entre o deslocamento longitudinal e a amplitude de libração das moléculas foi também estabelecida. Este tipo de estudo estrutural foi feito a partir de diagramas que não precisaram de ser corrigidos por efeitos instrumentais obtidos em poucos minutos. O diagrama de fases (T, n) foi determinado após um trabalho experimental de algumas horas.

Separação de fases em ligas e vidros. Numerosas

soluções cristalinas (ligas) e amorfas (vidros) apresentam um chamado "gap" de miscibilidade. Se por resfriamento rápido se introduz um sistema monofásico, dentro do "gap" de miscibilidade, ele evoluirá por difusão atômica até se chegar ao sistema bifásico de equilíbrio. A evolução estrutural da solução inicialmente homogênea, durante tratamentos isotérmicos, é deduzida a partir de considerações termodinâmicas e estatísticas, as quais permitem calcular a função de estrutura $S(k)$ que é a transformada de Fourier da função de correlação das posições atômicas $P(r)$. Utilizando radiação de sincrotron, é possível se dispor de um feixe incidente de seção pontiforme e, nessas condições, se obter diretamente a função intensidade de espalhamento $I(k)$, que é equivalente a função de estrutura teórica $S(k)$. Pode-se assim realizar uma comparação direta dos resultados teóricos e experimentais e, como consequência, se verificar as diversas teorias com suficiente precisão.

Estudos de separação de fases do sistema vítreo quase-binário B_2O_3 - PbO - (Al_2O_3) foram realizados com radiação de sincrotron a diversas temperaturas e composições, para diferentes tempos de tratamento isotérmico [10]. Estes tratamentos foram realizados "in situ" mediante o uso de uma câmara de altas temperaturas. Concluiu-se que as teorias estatísticas permitem descrever com boa aproximação a cinética de separação de fases, tanto na região central do "gap" (região espino-dal), quanto nas regiões vizinhas à binodal (regiões de nucleação e crescimento). Estes resultados mostram a inexistência de uma fronteira definida entre estes dois regimes sugerida na teoria termodinâmica de Cahn.

Pode-se chegar a estas conclusões após a análise de um número elevado de curvas de espalhamento para diversas temperaturas, composições e tempos (superior a 100), sendo que todo o trabalho experimental se realizou em apenas um "run" de doze horas.

Estudos da segregação em ligas com formação de zonas de Guinier-Preston, foram também realizados com radiação de sincrotron [11]. Neste caso realizaram-se estudos de espalhamento a dois comprimentos de onda. Um foi fixado vizinho à aresta de absorção do Zn ($\lambda = 1,29 \text{ \AA}$) e o outro afastado dessa aresta ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$). Quando se fazem estudos de espalhamento com radiação de um comprimento de onda vizinho de uma aresta, o fator atômico de espalhamento do elemento é modificado por um termo chamado de espalhamento anômalo. Na referência [11] foi mostrado que a análise das duas curvas de intensidade de espalhamento, permite a determinação das composições da matriz e das zonas de segregação. A técnica de espalhamento anômalo é também de utilidade no estudo de segregação em ligas binárias nas quais os elementos são vizinhos na tabela periódica. Nesse caso os fatores atômicos de espalhamento dos dois elementos são quase iguais não sendo possível se observar, em consequência, espalhamento apreciável nos estudos de separação de fases. Sintonizando o feixe incidente no comprimento de onda correspondente à aresta de absorção de um dos elementos, se incrementa significativamente a diferença entre os fatores atômicos e, consequentemente, se acrescenta a intensidade de espalhamento.

OUTRAS APLICAÇÕES DA RADIAÇÃO DE SÍNCROTRON

Ademais das aplicações descritas nas seções anteriores mencionaremos algumas outras, que adquiriram especial importância associadas à utilização da radiação de sincrotron:

Topografia de feixe branco. Obtem-se neste tipo de topografia uma imagem da superfície independente da orientação dos grãos, possibilitando, por exemplo, o es

tudo de transformações estruturais (recristalização, deslocamento de domínios, etc) e dinâmica de deslocamentos em tempo real.

Análise por fluorescência. A análise química de elementos em muito baixa concentração (10^{-11}) é possível quando se tem uma fonte de radiação de intensidade elevada como a de sincrotron. A intensidade da radiação de sincrotron permite também, mediante uma colimação apropriada, análises químicas locais similares as que se realizam com microsonda eletrônica, sem os requerimentos de vácuo desta técnica.

Radiografia. A obtenção de imagens por transmissão de peças heterogêneas pode ser feita de forma seletiva, mediante o método de subtração digital entre duas imagens obtidas com radiações de comprimentos de onda acima e abaixo das arestas de absorção de cada elemento. Isso permite uma análise não destrutiva que fornece a distribuição de cada tipo de átomo da amostra.

Difração por monocristais. A utilização do efeito de espalhamento anômalo permite a resolução do problema das fases, podendo-se assim se obter sem ambiguidade a estrutura atômica de sistemas monocristalinos complexos.

Microlitografia. A litografia mediante o uso de radiação de sincrotron, permite a produção de circuitos integrados com uma resolução bem maior que com lasers, já que o fator limitante (efeito de difração) se manifesta a uma escala menor quando se utiliza um comprimento de onda de ordem de 100 $\text{\AA}$, com radiação de sincrotron, em lugar de um comprimento de onda típico de 5000 $\text{\AA}$ no caso dos lasers.

COMENTÁRIOS FINAIS

As principais características dos anéis de armazenamento que fazem deles na atualidade fontes singulares, são a alta intensidade (100 a 10^4 vezes a intensidade de um gerador de raios X convencional) e a possibilidade de sintonização. O desenvolvimento de novos acessórios ("wigglers" e onduladores) poderão aumentar ainda mais a intensidade, em fatores da ordem de 10^4 . A utilização eficiente de feixes desta intensidade precisará do desenvolvimento de detectores suficientemente rápidos e da solução de problemas associados ao aquecimento dos monocromadores e amostras. No momento atual é difícil imaginar o volume de novas aplicações que poderão ser desenvolvidas com disponibilidade de feixes com as potências acima citadas.

Os laboratórios que utilizam radiação de sincrotron são em geral Laboratórios Nacionais aos quais se tem acesso após aprovação de proposta de pesquisa. A maior parte dos laboratórios são abertos à comunidade internacional. Eles tem características marcadamente interdisciplinares, já que a mesma técnica pode ser utilizada por cientistas de materiais, físicos, químicos, biólogos, mineralogistas, etc. Na atualidade existem anéis de armazenamento que são utilizados como fontes de radiação em vários países: U.S.A., Inglaterra, França, Alemanha, Itália e Rússia. Outras fontes estão em construção ou projetadas em vários outros países.

O CNPq instaurou um programa denominado Projeto Radiação Sincrotron, que visa incentivar a formação de recursos humanos nas diversas técnicas associadas à radiação de sincrotron e realizar um estudo de viabilidade de implantação no Brasil de um Laboratório Nacional de Radiação Sincrotron. Após uma ampla difusão nos meios científicos, realizou-se em julho de 1983, um Encontro no qual foi discutido o caso científico [12]. Na

atualidade estão se analisando e discutindo os aspectos técnicos relacionados com a localização e funcionamento eventual do futuro Laboratório Nacional e a construção e montagem de um anel de armazenamento de elétrons. O Laboratório proposto deverá ter as características típicas dos Laboratórios Nacionais e estará aberto a todos os usuários interessados, pertencentes às comunidades científica e tecnológica do País.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao laboratório LURE (Orsay, Université Paris-Sud) a possibilidade de utilização da radiação síncrotron em vários estágios que realizamos desde 1982 e aos pesquisadores desse laboratório, em particular Y. Petroff, D. Raoux e A. Fontaine, pelas numerosas discussões sobre as aplicações da radiação de síncrotron.

APÊNDICE

Para ilustrar o porte de um laboratório de radiação síncrotron descreveremos o complexo de Brookhaven (National Synchrotron Light Source). Nele se tem um anel de alta energia ($E=2,5\text{ GeV}$) para produção de raios X e um de baixa energia ($E=700\text{ MeV}$) para produção de radiações ultravioleta e visível (Fig.4).

O sistema de injeção está composto por um acelerador linear e um síncrotron "booster" que incrementam a energia dos elétrons até atingir a energia necessária para a alimentação do anel.

As linhas de luz emergem dos anéis tangencialmente à parte curva das órbitas eletrônicas nos ímãs defletores e nos "wigglers". Num anel pode-se instalar um elevado número de linhas. Elas podem

ainda ser subdivididas e se ter assim, várias estações experimentais por linha.

Os anéis de armazenamento estão na fase final de construção e as estações experimentais estão sendo instaladas. Uma fração importante das estações experimentais está sendo construída em diversos laboratórios de pesquisa e industriais, os quais uma vez em operação terão prioridade na sua utilização[13].

REFERÊNCIAS

- [1] Winnick, H. and Doniach, S., "Synchrotron Radiation Research", Plenum Press, New York, 1980.
- [2] Teo, B.K. and Joy, D.C., "EXAFS Spectroscopy", Plenum Press, New York, 1981.
- [3] Mimault, J., Fontaine, A., Lagarde, P., Raoux, D., Sadoc, A. and Spanjaard, D. "Elastic core effect and clustering tendency by EXAFS in as quenched Al-Zn alloys", Journal of Physics F. Metal Physics, vol.11, 1981, pp. 1311-1326.
- [4] Craievich, A., Dartyge, E., Fontaine, A. and Raoux, D., "Elastic core effect in isovalent solid solutions", Springer Series in Chemical Physics, vol. 27, 1983, pp. 274-276.
- [5] Fontaine, A., Lagarde, P., Naudon, A., Raoux, D. and Spanjaard, D., "EXAFS studies of Al-Cu alloys" Philosophical Magazine, vol. 40, 1979, pp.17-30.
- [6] Phizackerley, R.P., Rek, Z.U. and Stephenson, G.B., "An energy dispersive spectrometer for the rapid measurement of X-ray absorption spectra using synchrotron radiation" Journal of Applied Crystallography, vol. 16, 1983, pp.220-232.
- [7] Dexpert, F. Comunicação pessoal, 1984.
- [8] Lagarde, P., et Raoux, D., "Cours d'EXAFS", CBPF/PRS-015, 1984.
- [9] Craievich, A., Doucet, J. and Denicolò, I. "Molecular motion and conformational defects in odd-numbered paraffins", Physical Review B, in the press, 1984.
- [10] Bras, S., Craievich, A., Sanchez, J., Williams, C. and Zanotto, E., "SAXS study of phase separation in glasses using a new position sensitive detector", Nuclear Instruments and Methods, vol. 208, 1983, pp. 489-494.
- [11] Goudeau, P., Naudon, A., Fontaine, A. and Williams, C., "Anomalous small-angle scattering of Guinier-Preston zones in Al-Zn alloys. Applications in Metallurgy", Communication at the Symposium on Small Angle Scattering and Related Methods, Hasy-lab, Hamburg, August, 1984, p. 5.
- [12] Lobo, R. e Craievich, A., editores, "Técnicas e Aplicações da Radiação Síncrotron", CBPF/PRS-008, 1983.
- [13] Thomlinson, W.C & Williams, G.P., "The initial scientific program at the National Synchrotron Light Source", Report Brookhaven National Laboratory - 30351, 1981.

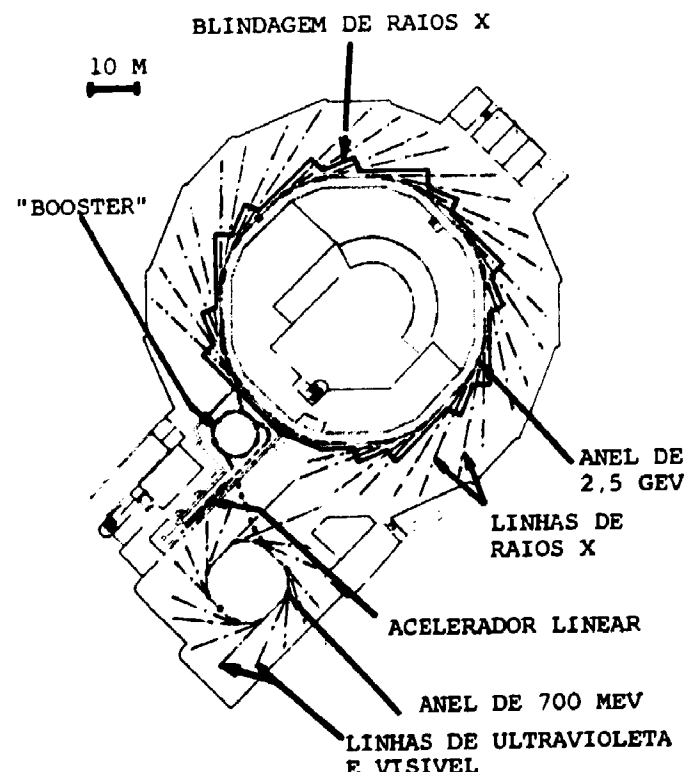


Figura 4. Planta do anel de radiação síncrotron NSLS (desativado) de Brookhaven.