

CBPF-NF-073/83

ONDULADORES E "WIGGLERS" - ASPECTOS TEÓRICOS

de

Constantino Tsallis

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CNPq/CBPF
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

ONDULADORES E "WIGGLERS" - ASPECTOS TEÓRICOS

Constantino Tsallis
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

RESUMO

"Wigglers" e onduladores são dispositivos magnéticos que podem ser adicionados ao redor de trechos (normalmente retos) do feixe de elétrons no anel de armazenamento, e que permitem obter características desejáveis da radiação síncrotron. O wiggler desloca, para energias maiores, o espectro da radiação, e eventualmente aumenta a sua intensidade. O ondulador gera picos intensos de radiação de frequências pré-escolhidas. Uma análise física destes efeitos é apresentada.

Palavras-Chave: Onduladores; Wigglers

RESUMO

"Wigglers" e onduladores são dispositivos magnéticos que podem ser adicionados ao redor de trechos (normalmente retos) do feixe de elétrons no anel de armazenamento, e que permitem obter características desejáveis da radiação síncrotron. O wiggler desloca, para energias maiores, o espectro da radiação, e eventualmente aumenta a sua intensidade. O ondulador gera picos intensos de radiação de frequências pré-escolhidas. Uma análise física destes efeitos é apresentada.

Palavras-Chave: Onduladores; Wigglers

A função primeira dos imãs flectores ("bending magnets") do anel de armazenamento é manter convenientemente o feixe eletrônico em órbita fechada (aproximadamente circular). Esta função é parcialmente incompatível com a produção de radiação com características otimizadas do ponto de vista do usuário. Não surpreende portanto que possam existir dispositivos magnéticos adicionais especificamente projetados para este fim: é nesta categoria que se enquadram os onduladores e os "wigglers". /1-4/ Eles apresentam uma forma externa aproximadamente paralelepipedica cujo maior comprimento é tipicamente de um a dois metros (podendo chegar a comprimentos ainda maiores no caso dos onduladores); seu peso é tipicamente de uma a duas toneladas. Eles são colocados ao longo de trechos retos do anel de armazenamento, o qual pode comportar varias unidades sem maiores complicações já que eles são projetados de modo a praticamente não interferirem nas características do feixe eletrônico. Onduladores e wigglers produzem um campo magnético estático transversal (horizontal ou vertical nos dispositivos planares, helicoidal nos dispositivos helicoidais) ao movimento médio dos eletrons; este campo é espacialmente alternado apresentando N períodos (tipicamente N = 1-8 para wigglers; N=20-100 para onduladores). Sob ação desta distribuição de campos magnéticos o feixe eletrônico descreve um movimento zigzagueante semelhante àquele de um esquiador praticando "slalom"; analogamente ao esquiador que projeta neve nas "viradas" (momentos de maior aceleração), o feixe eletrônico irradia fotons intensamente nas regiões mais curvadas de sua trajetória.

Os wigglers aumentam a energia crítica ϵ_c da radiação. Lembremos que ϵ_c é definido como aquele valor da energia fotônica tal que metade da potência eletromagnética é irradiada para energias maiores que ϵ_c , e é dado por

$$\epsilon_c \text{ (KeV)} = 2.218E^3 \text{ (GeV)} / \rho \text{ (m)} = 0.06651 B \text{ (KG)} E^2 \text{ (GeV)} \quad (1)$$

onde E é a energia do feixe eletrônico, ρ o raio de curvatura

da trajetória dos eletrons e B o campo magnético aplicado. Os wigglers podem também aumentar a intensidade irradiada (proporcional a N). A sua função primeira é tornar acessíveis para o usuário regiões energéticas mais duras sem aumentar a energia do feixe eletrônico.

Os onduladores não alteram sensivelmente ϵ_c mas produzem no espectro linhas intensas moderadamente sintonisáveis. A intensidade podendo atingir proporcionalidade com N^2 , esta radiação se torna atraente para diversas experiências (estáticas ou dinâmicas) em Biologia, Física Atômica, Molecular, de Sólidos, e até Nuclear (separação isotópica de U^{235} do U^{238}).

Como já mencionado, wigglers e onduladores são construídos de modo a alterar muito pouco as características do feixe. É por esta razão que sua estrutura admite simetria especular em relação ao plano perpendicular ao feixe que passa pelo meio do dispositivo (ver Figs. 1 e 2): conseqüentemente um $N\lambda$ -wiggler (ou ondulador) contém um pouco mais que N períodos. Estritamente falando o fenômeno físico que acontece em ambos wigglers e onduladores é um só, um mesmo aparelho podendo, em princípio, ser operado tanto como wiggler quanto como ondulador. Eles são caracterizados pelo índice (adimensional) do campo K dado por

$$K = 0.0934 B_1 \text{ (KG)} \lambda_w \text{ (cm)} = \gamma \alpha \quad (2)$$

onde B_1 é o campo máximo no eixo do wiggler, λ_w é o seu período, $\gamma^{-1} \equiv m_0 c^2 / E = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ e α é o ângulo de desvio máximo em relação ao movimento médio do feixe eletrônico ($m_0 \equiv$ massa em repouso do eletron, $c \equiv$ velocidade da luz, $v \equiv$ velocidade média dos eletrons); lembramos que γ^{-1} é a abertura angular do feixe de luz sincrotrônica.

Distinguimos ondulador fraco ($K \ll 1$; e.g. $K = 0.2$), ondulador forte ($K \gg 1$; e.g. $K = 1.4$) e wiggler ($K \gg 1$; e.g. $K \approx 100$). Distinguimos também o dispositivo planar (que irradia luz polarizada linearmente, com campo elétrico \vec{E} paralelo à aceleração do eletron) do dispositivo helicoidal (que irradia luz polarizada circularmente). Valores típicos de B_1 são 2KG para ondulador, 20KG para wiggler com imã convencional e 50 KG para wiggler super

condutor (a serem comparados com 10KG, valor típico dos imãs flectores do anel de armazenamento); um valor típico de λ_w é 5cm. Para uma energia eletrônica $E = 0.8$ GeV, imãs flectores de 12KG fornecem $\epsilon_c = 0.51$ KeV; este valor é levado para 0.77 KeV com um wiggler convencional de 18KG, e para 2.13 KeV com um wiggler supercondutor de 50KG (excelente opção para estudos de biologia e de superfícies com UVV e raios-X macios).

Analiseemos qualitativamente o que acontece em onduladores e wigglers, começando com o ondulador fraco onde o fenômeno é mais simples.

Trata-se da interferência entre os ftons emitidos por um eletron (ou eventualmente um conjunto de eletrons mais próximos entre se que o comprimento de onda da radiação emitida) ao longo de sua trajetória. Na Fig. 3.a está representado o lóbulo eletromagnético emitido por um eletron acelerado em ambos referenciais do feixe (movimento médio) e do laboratório: somente os harmônicos ímpares estão presentes, o movimento do eletron dentro do ondulador sendo uma oscilação transversal no referencial do feixe. Ao aumentar o campo magnético aumenta a amplitude da oscilação transversal e portanto também da longitudinal (lembramos que o campo magnético não trabalha portanto a velocidade se conserva em módulo), o eletron descrevendo uma oscilação em forma de 8; nestas circunstâncias aparecem também os harmônicos pares na radiação (ver Fig. 3.b).

Na Fig. 4 está representado o essencial da interferência: o eletron demora um tempo λ_w/v para percorrer um período do ondulador, enquanto o foton somente demora λ_w/c , portanto a condição de interferência construtiva está dada por $\lambda/c = \lambda_w/v - \lambda_w/c$, isto é

$$\lambda = \lambda_w \left(\frac{c}{v} - 1 \right) \approx \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \quad (3)$$

Esta expressão é correta no limite de campos muito fracos e para ângulo de observação θ nulo (medido a partir do eixo do movimento médio do feixe eletrônico). Para campos e angulos mais apreciáveis a equação (3) se generaliza como segue:

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left[1 + \bar{c}K^2 + (\gamma\theta)^2 \right] / n \quad (4)$$

onde \bar{c} vale 1/2 para ondulator planar e 1 para ondulator helicoidal, e n é a ordem do harmônico em consideração. Observamos que a presença do campo magnético (proporcional a K) desloca a radiação para energias menores, o efeito sendo mais pronunciado para harmônicos superiores. Vemos também que a energia observada depende do ângulo de observação.

Estes dois efeitos conjuntamente com as influências (mais complexas) do campo magnético e da colimação sobre a intensidade do espectro explicam a evolução apresentada nas Figs. 5, 6 e 7. Deste modo o mesmo aparelho pode, em princípio (mas não na prática tecnológica) funcionar como ondulator (gerando, no limite de campos magnéticos fracos e colimação extrema, picos de intensidade proporcional a N^2 , produto de extrema coerência que produz uma amplitude luminosa proporcional a N) assim como wiggler (gerando, no limite de campos magnéticos fortes e colimação inexistente ou pouco restritiva, um espectro contínuo de intensidade proporcional a N , produto da quase total incoerência dos fons gerados).

Para concluir, é oportuno mencionar que o uso de wigglers e onduladores que está sendo feito em Tokyo, Stanford, Frascati, Daresbury, Orsay, etc. corrobora e consolida a visão de que estes equipamentos constituem ferramentas preciosas (e relativamente econômicas) para o aproveitamento mais eficiente da radiação sincrotron.

É com prazer que agradeço as discussões mantidas sobre o tema com A.F. Craievich.

REFERÊNCIAS

- 1) D.J.Thompson and M.W. Poole, "European Synchrotron Radiation Facility", Suppl. II, "The Machine" (European Science Foundation, Strasbourg 1979) 49-65
- 2) H.Winick and S. Doniach, "Synchrotron Radiation Research" (Plenum Press, New York, 1980), Chap. 21, 663-716.
- 3) Y. Farge, Appl. Optics 19(1980)4021-4026
- 4) H. Winick, G. Brown, K. Halbach and J. Harris, "Wiggler and undulator magnets", Physics Today (May 1981) 50-63
- 5) C. Tsallis, "Annihilation de deux particules et dispersion des particules créées - 1964 (difusão pelo CNRS Bellevue-França em 1968)

CAPTION FOR FIGURES

- Fig. 1 - Onduladores de campo vertical gerado por imãs permanentes feitos de blocos de material SmCo_5 . O feixe é indicado retilíneo por causa da amplitude da oscilação ser muito pequena (tipicamente 0.02mm) comparada à largura do feixe. (Ref. 4)
- Fig. 2 - Diagrama de um wiggler (Ref. 1)
- Fig. 3 - Movimento de um eletrôn (com velocidade ao longo de Z) do feixe e diagrama da radiação emitida: movimento transversal (aceleração ao longo de Z; harmônicos ímpares são gerados) no referencial de massa (a) e no referencial de laboratório (b); movimento longitudinal (aceleração ao longo de X; harmônicos pares são gerados) no referencial de massa (c) e no referencial de laboratório (d) (Ref. 5)
- Fig. 4 - Diagrama da trajetória de um eletrôn dentro de um ondulator ou wiggler, e ângulos relevantes.
- Fig. 5 - Espectros de ondulator calculados para 3.0GeV e diferentes valores do campo magnético de pico (B_0). Os efeitos de tamanho finito e divergência do feixe eletrônico estão incluídos. O detetor é suposto estar a 25m do ondulator (Ref. 4)
- Fig. 6 - Espectro incluindo harmônicos superiores produzido por ondulator de imã permanente de 30 períodos com

eletrons de 3 GeV. Anteparos foram incluídos para definir acceptance angular muito pequena (da ordem de 10^{-5} radian) (Ref. 4).

Fig. 7 - Espectros qualitativos de radiação de ondulator:(a) campo fraco ($K \ll 1$) e feixe bem colimado; (b) campo fraco ($K \ll 1$) e feixe pouco colimado; (c) campo forte ($K \gg 1$) e feixe bem colimado; (d) campo forte ($K \gg 1$) e feixe pouco colimado (Ref. 1).

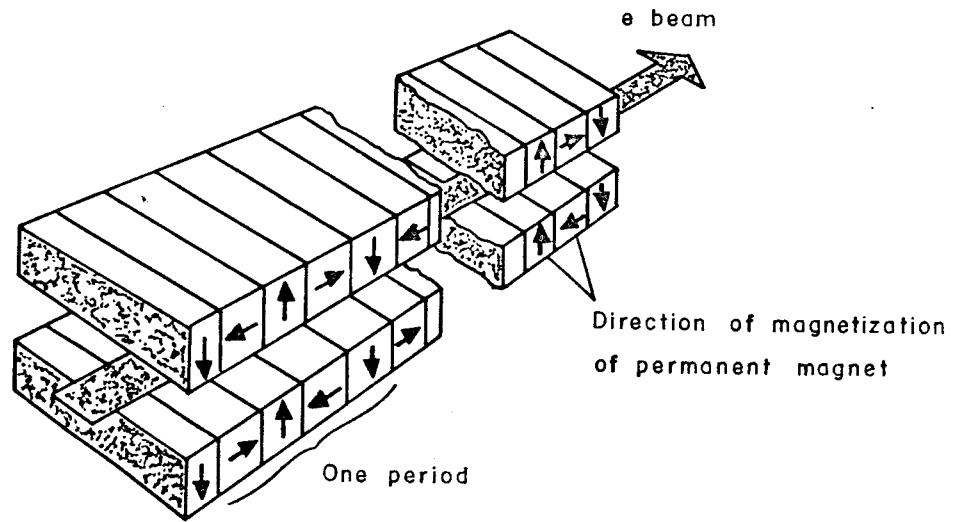


FIG. 1

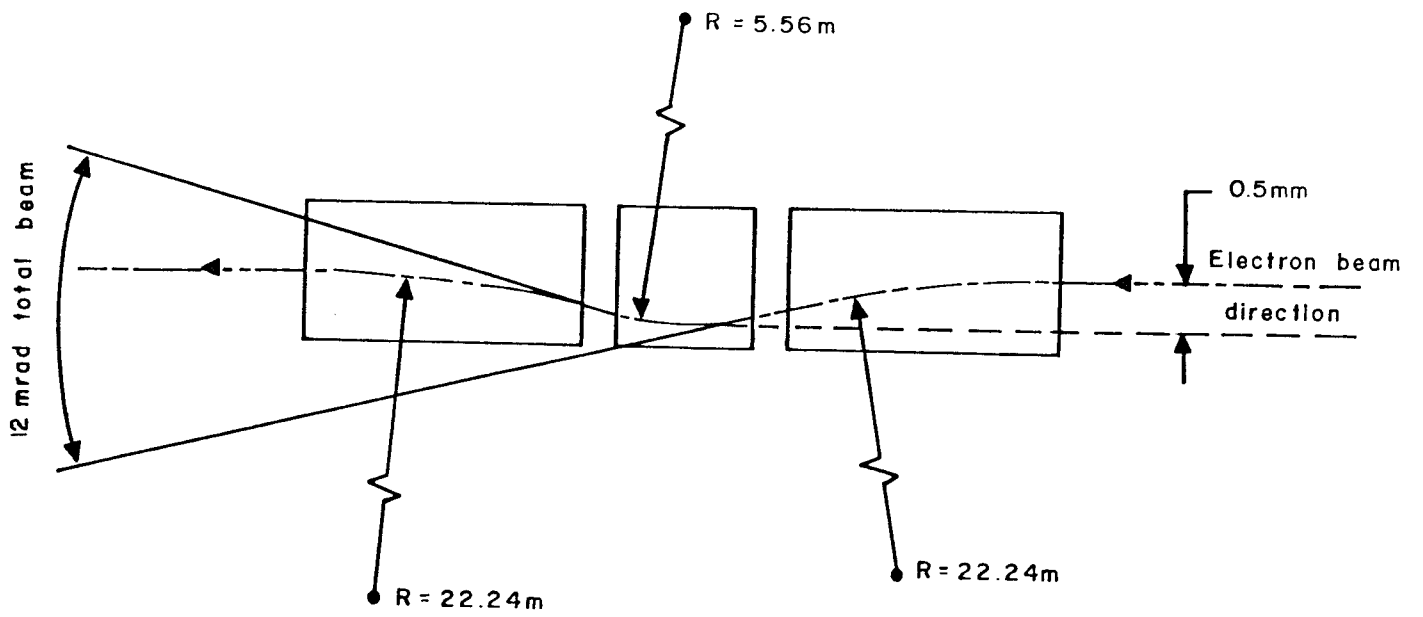


FIG. 2

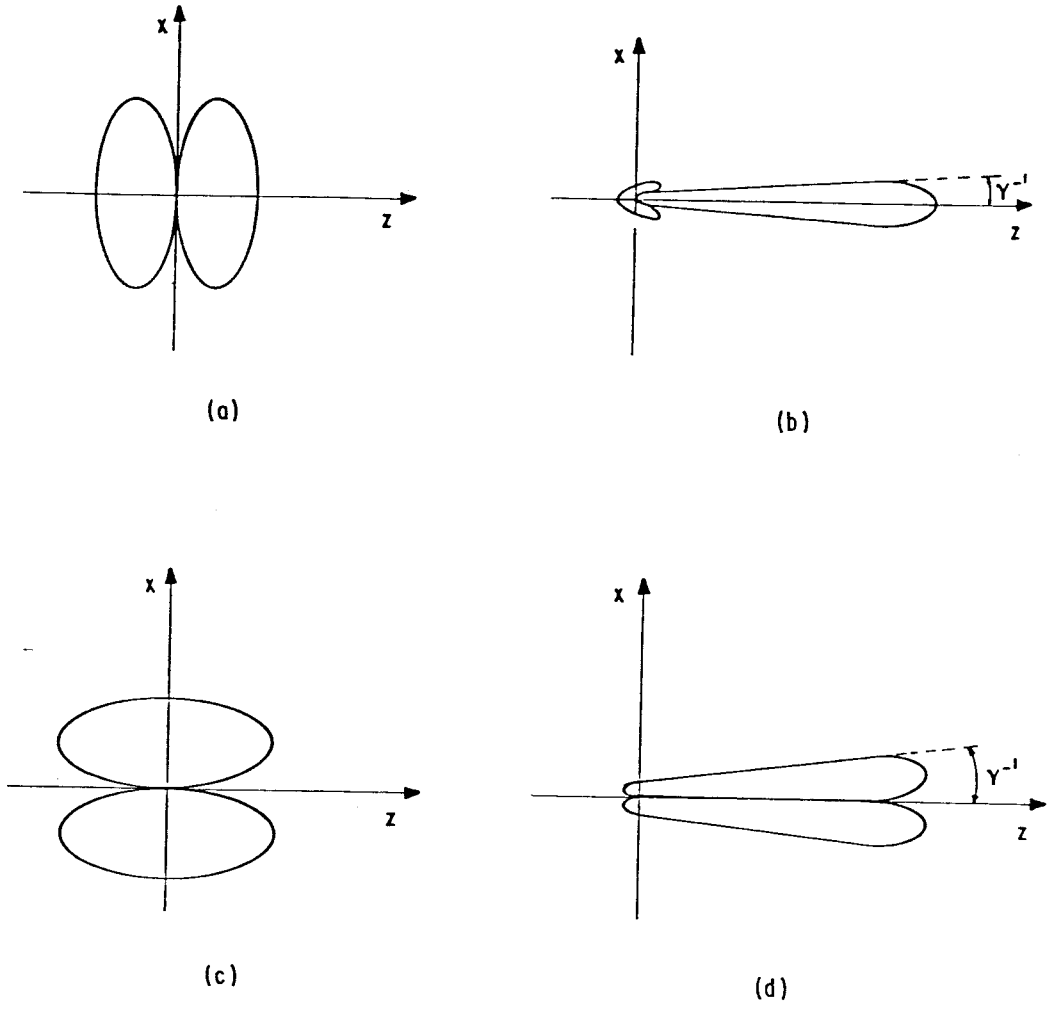


FIG.3

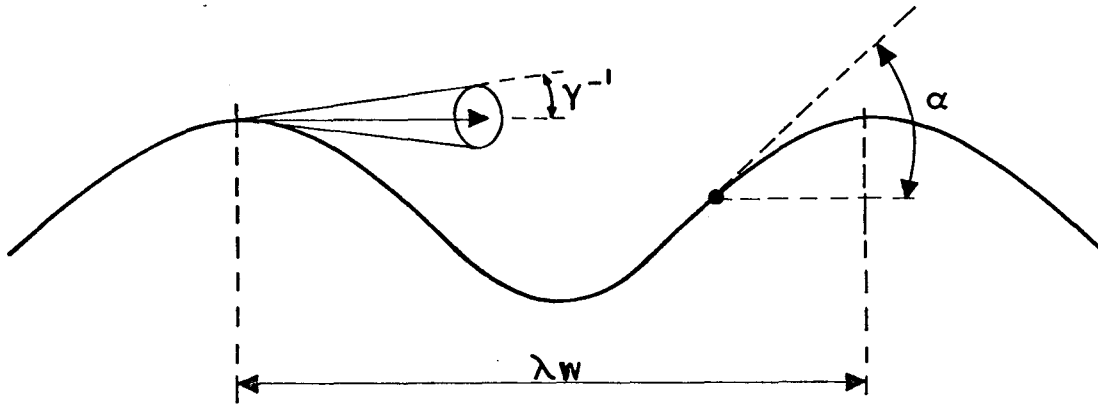


FIG. 4

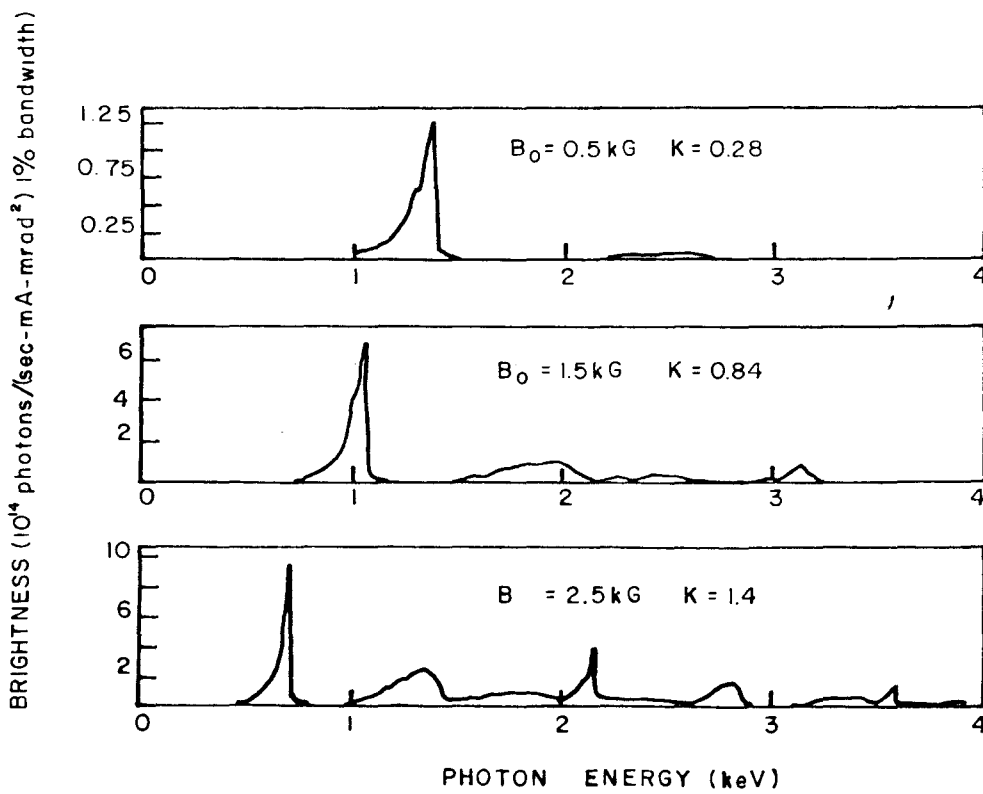


FIG. 5

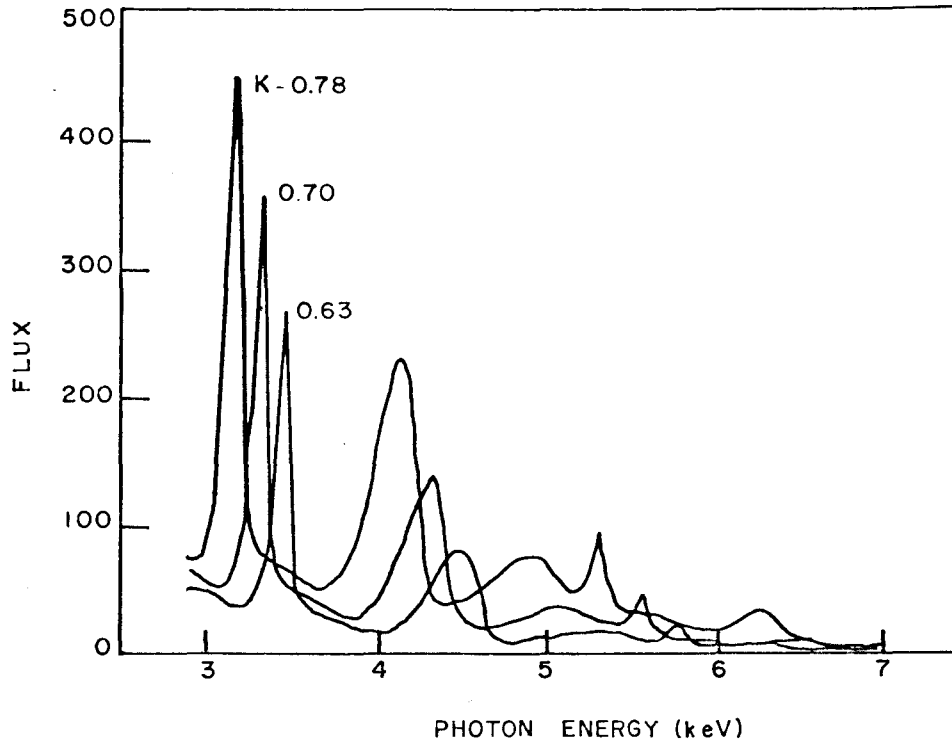
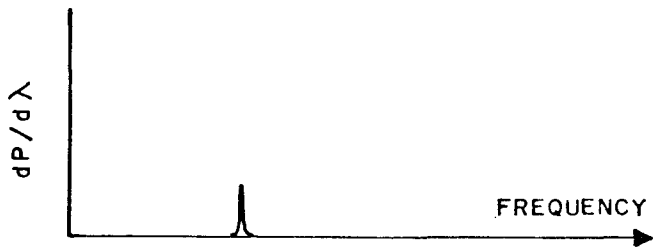
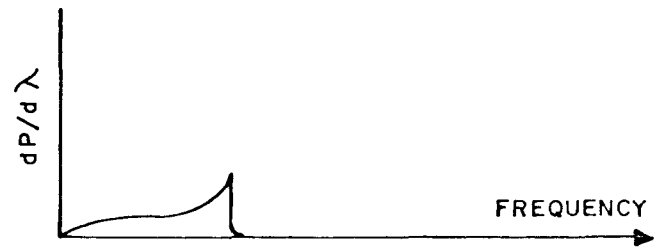


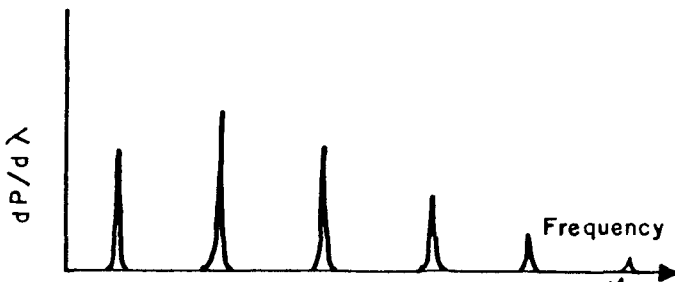
FIG. 6



(a)



(b)



as K increases, peak frequencies shift and more higher harmonics appear

(c)



----- N times spectrum from uniform magnet with $B = B_0$

(d)

FIG. 7