واکنشهای هسته ای و رادیواکتیویته

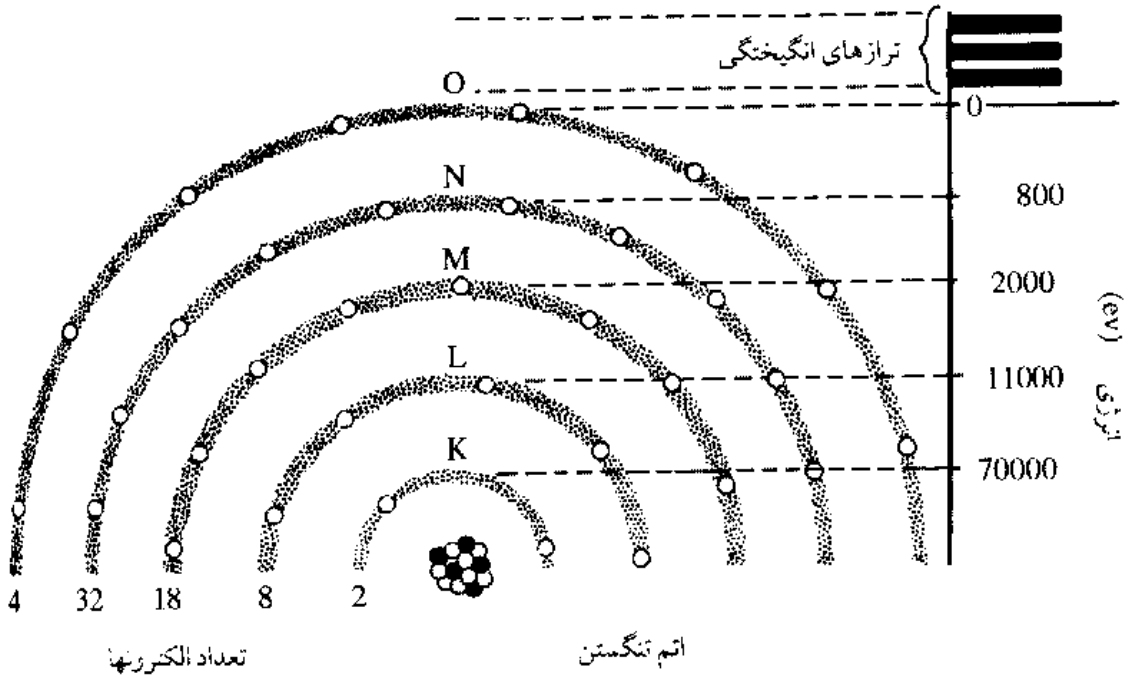
دکتر محمد علی عقابیان
گروه فیزیک پزشکی
www.oghabian.net

(۱)
ساختمان و خصوصیات هسته
حالتهای ناپایدار و برانگیخته هسته

Atomic Models

- Thomson
- Rutherford
- Bohr
  - Electron in separate shells in different energy level; K, L, M, N, …
  - It is not ideal for multi-electron atoms
- Quantum number based atoms
  - Principal quantum number (n=1,2,3,4..) for K,L,N,..
  - Azimuthal (سمت یا زاویه) (l=n-1: l=0,1,2,3,…)
  - Magnetic orbital quantum number (m shows spatial shell direction in presence of ext. magnetic field)
  - Spin quantum number (s=±1) Rotational electron

Bohr Model



شکل (۲-۴) *نمایش اتم بور بگونه‌ای ساده با ترازهای انرژی*

حالت های اتم

- **حالت پایه‌ای:**
  - هر الکترون در پایین ترین سطح انرژی است.
- **حالت انگیزش:**
  - با دریافت انرژی الکترون تراز انرژی بالاترمی‌رود.
- **حالت یونش:**
  - جفت یون
  - انرژی جنبشی الکترون $E_k = E_i - E_b$
  - تابش امواج الکترومغناطیس ایکس وقتی الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر برای پر کردن جای خای الکترون می‌رود.

مدلهای هسته ای

- **مدل قطره ای:**
  - **انرژی پیوند هسته ای، تابش های ذره ای مانند α, β و تلاشی هسته را شرح می‌دهد.**
- **مدل لایه ای:**
  - **تابش امواج الکترومغناطیس γ را شرح می‌دهد.**
- **مدل سد پتانسیل:**
  - **اگر به ذره ای انرژی کافی داده شود از هسته بیرون می رود (بمبارانهای ذره ای هسته را شرح می‌دهد).**
  - **: انرژی پیوند هسته برای هر هستک بین ۵ تا ۸ Mev تغییر می‌کند و اگر هسته برانگیخته شود با تابش ذره یا امواج الکترومغناطیس به حالت پایه برمیگردد.**

انرژی پیوند هسته‌ای

- اگر جرم تک‌تک هستکها را جمع کنیم بیشتر از جرم اتم کامل است این اختلاف جرم (Δm) را **کاهش جرمی** می‌گویند که هم‌تراز یک مقدار انرژی براساس $E=mc^2$ است.
  - این انرژی هنگام تشکیل اتم تابش شده است و بنام **انرژی پیوند هسته** معرفی می‌شود.
  - برای اتم هلیم این انرژی معادل 28.8 Mev است.
  - اگر انرژی پیوند را بر جرم اتمی تقسیم کنیم = انرژی پیوند هر هستک
  - عناصر با **جرم متوسط** دارای انرژی پیوند هستک بیشتر از عناصر با **جرم سنگین** بوده و لذا پایدار تر هستند.

نیروهای پیوند هسته‌ای

- یوکاوا ۱۹۳۵: نیروهای پیوند هسته مانند نیروهای تبادلی الکترونها از به اشتراک گذاشتن یک ذره در هسته بوجود می‌آیند.
- پاول: این ذرات را پیون یا مزون‌پی معرفی کرد که دارای جرمی معادل ۲۷۶ برابر الکترون است.
- واکنشهای میان پروتون و نوترون بصورت زیر است و این دو ماهیتشان را بطور پیوسته به همدیگر عوض می‌کنند.

$$p \Leftrightarrow n + \pi^{+}$$

$$n \Leftrightarrow p + \pi^{-}$$

$$p \Leftrightarrow p + \pi^{0}$$

$$n \Leftrightarrow n + \pi^{0}$$

پایداری هسته

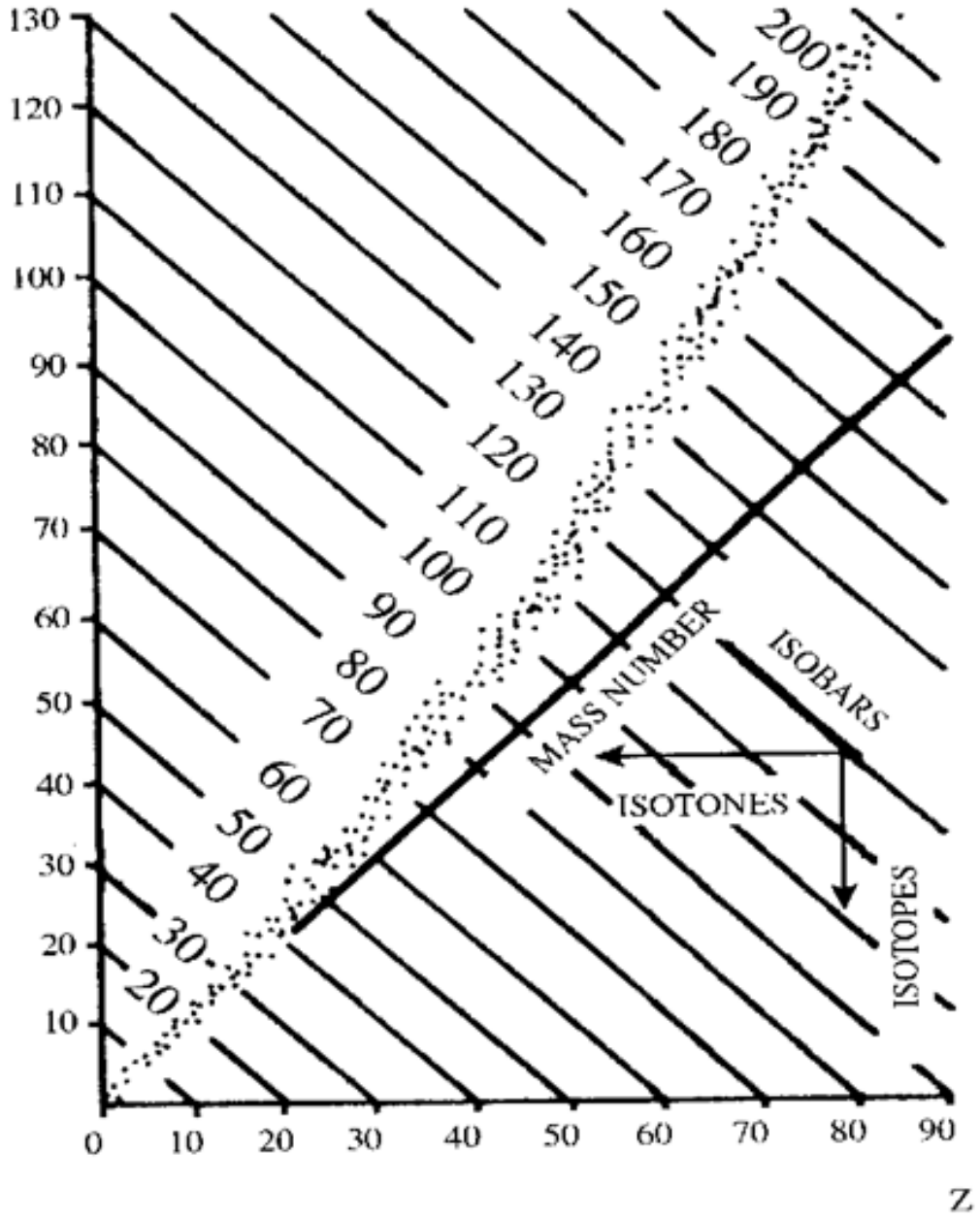
- ترازمندی بین دو نیروی کششی (میان پروتون ها و نوترون ها) و رانشی (میان پروتون و پروتون) **پایداری هسته** را بعهده دارد.
- نظریه های ناپایداری هسته ای:
  - نسبت نوترون به پروتون n/Z (شکل)
  - اگر n/Z بیشتر و یا کمتر از خط پایداری باشد هسته ناپایدار و با تابش خودبخودی ذره و گاهی گاما به پایداری می‌رسد.
    - این حالت را دگرگونی، فروپاشی، و یا واپاشی (Decay or disintegration) نامیده می‌شود.

$$ {}_{0}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}_{1}^{1}\mathrm{p} + \overline{\beta} + {}_{0}^{0}\overline{\nu} $$

$$ {}_{1}^{1}\mathrm{p} \rightarrow {}_{0}^{1}\mathrm{n} + \beta^{+} + {}_{0}^{0}\nu $$

- ذره $\overline{\nu}$ آنتی نوترینو نام دارد.
- نوترینو دارای جرم صفر و بدون بار بوده و با سرعت نور حرکت می کنند و تفاوت میان دو ذره در اسپین آنهاست.

نسبت نوترون به پروتون n/Z



(۲)
واکنشهای هسته ای و فرآیندهای پرتوزا

تاریخچه رادیواکتیویته

- در سال ۱۸۷۶ دوسن وکتور به وجود رادیو اکتیو در اورانیوم پی برد.
- هانری بکرل همان اثر را در سال ۱۸۹۶ مشاهده کرد.
- در سال ۱۸۹۸ ماری کوری دریافت که این پدیده علتش نفوذ پرتوی است که از رادیوم و پولونیوم تابش می‌شود.
- پرتوی ناشناخته‌ای توسط ویلهم رونتگن در سال ۱۸۹۵ کشف شد.
- در سال ۱۸۹۹ رادر فورد پرتو آلفا و بتا را که از اورانیوم حاصل شد شناخت.
- در سال ۱۹۰۸ کوری و ویلارد پرتوی سومی کشف کردند که آنرا پرتو گاما نامیدند.

پایدار شدن هسته

- یک هسته ناپایدار یا رادیو نوکلئید با پیمودن راه دگرگونی سعی در پایدار شدن می نماید
- (واکنشهای خودبخودی انرژی زا هستند).

دگرگونی تک گام

$$^{131}_{53}I \rightarrow ^{131}_{54}Xe$$

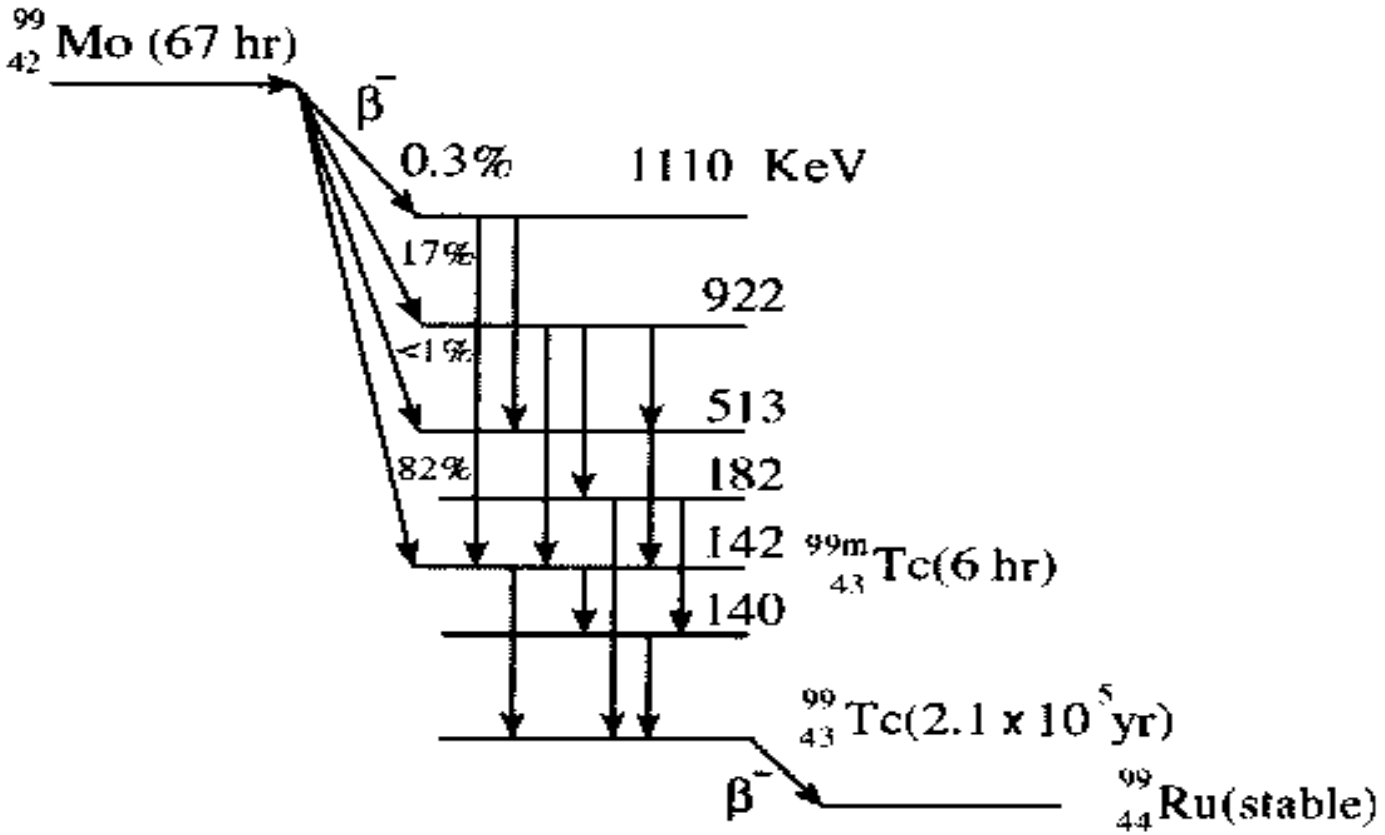
دگرگونی در چند گام

$$^{99}_{42}Mo \rightarrow ^{m99}_{43}Tc \rightarrow ^{99}_{43}Tc \rightarrow ^{99}_{44}Ru$$ (Ruthenium)

- رادیو اکتیویته(Radioactivity)

- رادیو اکتیویته تابش خود بخودی ذره ها یا امواج الکترو مغناطیسی از هسته یک اتم است این فرایند فرایندی کاتوره ای و آماری است

واکنشهای $^{99}_{42}Mo$ و تولید $^{99}_{43}Tc$ جهت مصارف پزشکی



Ruthenium

واکنشهای هسته ای جهت تولید هسته های ناپایدار و تولید انرژی

۱- شکافت یا تلاشی هسته (Nuclear Fission)

۲- جوش هسته ای (Nuclear Fusion)

۳- بمباران هسته توسط ذرات مثل پروتون، نوترون، دوتریوم، تریتیوم و یا گاما

شکافت یا تلاشی هسته(Nuclear Fission)

- در این روند هسته خودبخود شکافته و به دو بخش (نزدیک به هم اندازه) تقسیم می شود.
- این فرایند در هسته های بسیار سنگین رخ می دهد.
- افزودن اندکی انرژی مانند انرژی که نوترون می تواند به هسته بدهد باعث تلاشی هسته به دو بخش کوچکتر می گردد.
- در تلاشی گرمایی هسته ها به وسیله نوترونهایی آهسته یا گرمایی (انرژی ۰.۰۲۵ev) بمباران می شود.
  - مثال:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow A + B + (2-3)^{1}_{0}n + 200MeV$$

- چون این واکنش با کاهش جرمی همراه است انرژی فراوانی آزاد می گردد.
- نوترونهای به دست آمده از این واکنش نوترو نهای پر سرعت هستند.

شکافت یا تلاشی هسته(Nuclear Fission)

- این نوترونها برای این که دوباره در واکنش وارد شده و هسته های **U235** را به **U236**تبدیل کنند باید آهسته یا گرمایی شوند. این کار در راکتورهای هسته ای به وسیله آب، گرافیت یا آب سنگین انجام می گیرد.

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{131}_{53}I + ^{102}_{39}Y + 3^{1}_{0}n + 200MeV$$

Yttrium

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{99}_{42}Mo + ^{135}_{50}Sn + 2^{1}_{0}n + 200MeV$$

Tin قلع

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{137}_{55}Cs + ^{97}_{37}Rb + 2^{1}_{0}n + 200MeV$$

Rubidium

- برای برهم زدن هسته 238U نوترونهای با انرژی بیشتری نیاز است.
- این تلاشی را تلاشی سریع می نامند و ممکن است بوسیله بمباران با ذرهٔ باردار و یا با فوتون هم انجام گیرد.

جوش هسته ای (Nuclear Fusion)

- روندی است که در آن هسته های سبک ترکیب می شوند تا هستهٔ سنگین تـری بسـازند و همانند تلاشی هسته ای واکنشهای جوش هسته ای انرژی زا هستند.
- مثال:

$$ {}_{1}^{2}H + {}_{1}^{2}H \rightarrow {}_{2}^{3}He + {}_{0}^{1}n + 3.25MeV $$

$$ {}_{1}^{2}H + {}_{1}^{3}H \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{0}^{1}n + 17.6MeV $$

- روند جوش هسته روندی است که خورشید بر پایهٔ آن انرژی ایجاد می کند.
- جوشهای اتمهای هیدروژن دمایی نزدیک به چندین میلیون درجه سانتیگراد نیاز دارد.

بمباران هسته توسط ذرات

- این روش در برگیرنده بمباران هسته یک اتم از یک عنصر دلخواه بو سیله ذره ها می‌باشد.
- هستهٔ مادرو هستهٔ دختر

$$ {}^{A_1}_{Z_1}X + P_i \rightarrow {}^{A_2}_{Z2}Y + P_0 $$

$$ {}^{32}_{16}S + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{32}_{15}P + {}^{1}_{1}P \qquad {}^{32}S(n,P)^{32}P $$

$$ {}^{197}_{79}Au + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{198}_{79}Au + {}^{0}_{0}\gamma \qquad {}^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au $$

- ذره بمباران کننده می تواند پروتون، نوترون، هسته هلیوم، دوتریوم، تریتیوم و ذرات دیگر باشد.

فرآیندهای واپاشی در هسته هایی که بطور مصنوعی رادیوایزوتوپ می شوند

بوسیله بمباران هسته توسط ذرات رادیوایزوتوپهایی تولید میگردند که با دگرگونی و تابش ذرات (آلفا، بتا، پوزیترون)، و یا گاما به حالت پایدار می‌رسند.

تعدادی از اینها اینها کاربرد پزشکی دارند.

تابش ذرات آلفا

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha + \gamma + Q $$

$$ {}^{226}_{88}Ra \xrightarrow{1622Y} {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He + \gamma $$

$$ Radium \rightarrow Radon $$

- **ویژگیهای ذرات آلفا:**
  - ذره های آلفای تابش شده، در یک دگر گونی تک انرژی هستند.
  - دارای انرژی از ۳ تا ۹ میلیون الکترون ولت می باشند.
  - برد ذره آلفا وابسته به انرژی آن است.

دگرگونی با تابش بتا

- این پدیده با واگردانی یک نوترون به یک پروتون انجام می شود یعنی:

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}P + {}^{0}_{-1}\beta + {}^{0}_{0}\bar{\nu} + Q $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}\beta + {}^{0}_{0}\bar{\nu} + \gamma + Q $$

$$ {}^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}\beta + {}^{0}_{0}\bar{\nu} + \gamma $$

- گاهی که تابش بتا هستهٔ دختر را مستقیما در حالت پایه ای قرار ندهد، تابش گاما این کار را انجام می دهد.

ویژگیهای ذره های بتا

- ذرهٔ بتا دارای بار 1.6×10^{-19} کولن و
- جرم ایستای $m_0 = 9.10\times10^{-31}$ کیلوگرم است.
- بیناب یک تابش کنندهٔ خالص بتا دارای پیوستکی است و انرژی آن از تا یک اندازهٔ بیشینه E_{max} تغییر می کند.

تابش پوزیترون

- **دگر گونی با تابش پوزیترون**
- **هسته های ناپایدار با داشتن نسبت $\frac{N}{Z}$ پایین دچار کمبود نوترون هستند.**

$$ {}^{1}_{1}P \rightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+} + {}^{0}_{0}\nu + Q $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \beta^{+} + {}^{0}_{0}\nu + \gamma + Q $$

$$ {}^{68}_{31}Ga \rightarrow {}^{68}_{30}Zn + \beta^{+} + {}^{0}_{0}\nu + \gamma $$

- **برای خلق پوزیترون انرژی لازم باید به وسیله هسته مادر در دسترس باشد.**
- **این انرژی مورد نیازجرم ذره پوزیترون به اضافهٔ پاد ماده آن الکترون است.**
- **بنابراین انرژی لازم $2m_0c^2$ است.**
- **از این رو تا جرم اتمی هستهٔ دختر به اندازهٔ دو الکترون از جرم هستهٔ مادر سبکتر نباشد، تابش پوزیترون نمی تواند انجام گیرد.**

دگر گونی با ربایش الکترون(Electron Capture)

- شماری از رادیونـو کلئیـدها دارای نسـبت $\frac{N}{Z}$ پـایین و نـادلخواه هسـتند و تفاوت تراز انرژی هستهٔ مادر و هستهٔ دختر از $2m_0c^2$ کوچکتر است از ایـن رو β^+ نمی تواند تابش شود.

$$e^- + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{0}\nu + \gamma + Q$$

$${}^{125}_{53}I + e^- \rightarrow {}^{125}_{52}Te + {}^{0}_{0}\nu$$

Tellurium

- چنین هسته هایی با روند ربایش الکترون دگرگون می شوند.
- الکترون گرفته شده توسط هسته با یک پروتون ترکیب می شود تا یک نوترون ساخته شود.

تابش پرتو گاما (Gamma ray emission)

- پرتو گاما یکی از گونه های تابش الکترو مغناطیسی است.
- چون انرژی E و بسامد f در موج الکترو معناطیسی با پایای h ثابت پلانک به هم وابسته هستند.

$$(E=hf)$$

- امواج الکترو معناطیس دارای ویژگیهای زیر می باشند:
- دارای بار الکتریکی نیستند.
- دارای جرم نمی باشند.
- با سرعت نور حرکت می کنند.
- بسامد و طول موج آنها بستگی $C=\lambda . f$ را دارا هستند.

گذشت ایزومری

- گاهی دگرگونی با تابش آلفا، بتا و یا پوزیترون, باعث قرار دادن هسته دختر میان دو تراز انرژی پایه ای مادر و دختر می‌گردد. در این وضعیت هسته دختر در حالت انگیخته است.

- هنگامی که حالت انگیخته برای یک مدت زمان قابل اندازه گیری طول بکشد به آن ناپایدار گویند.
- حالت ناپایدار را با افزودن یک حرف m به جرم اتمی نشان میدهند.

$$(^{99m}Tc\,,\ ^{60m}Co)$$

- برای جا گرفتن به حالت پایه ای, با آزاد شدن انرژی همراه است.

گذشت ایزومری

- در این روند تغییری در عدد اتمی و یا عدد جرمی ایجاد نمی شود.
- هسته هایی که دارای یک Z و A می باشند و در حالت های متفاوت کوانتومی هستند, هسته های ایزومر (Nuclear Isomers)خوانده می شوند.
- روند واانگیختگی این ایزومر ها را گذشت ایزو مری می گویند.
- در گذشت ایزو مری پرتو گاما تابش می شود.

(۳)
برهمکنش پرتوها و ذرات پرانرژی با ماده

برخورد پرتو الفا با ماده

- ◄ذره های الفا هسته های اتمهای هلیومی هستند که الکترون ندارند.
- ◄چون ذره آلفا دو یکای بار مثبت دارددارای توان برخورد بالایی است.
- ◄ذرهٔ آلفا انرژی خود را با یونش و انگیخته کردن اتمهایی که در مسیرش با آنها بر خورد می نماید، از دست می دهد.
- ◄اگر مواد رادیو اکتیو وارد بدن شده و الفا تابش کنند خطر پرتو تابی درونی بسیار بالا است.
- در پایان راه ذره الفا، دو الکترون گرفته و به هلیوم تبدیل می شود.

برخورد پرتو بتا با ماده

- به علت جرم کوچک و بار منفی ذره های بتا این ذرات به آسانی بوسیلهٔ نیروی کششی قوی هسته ای تحت تآثیر قرار می گیرد.

- اندازهٔ از دست دادن انرژی در این بر خورد می تواند از صفر تا همهٔ انرژی ذره باشدو ذرهٔ هنگامی که انرژی را از دست می دهد به درون هسته کشیده میشود.

برخورد پرتو بتا

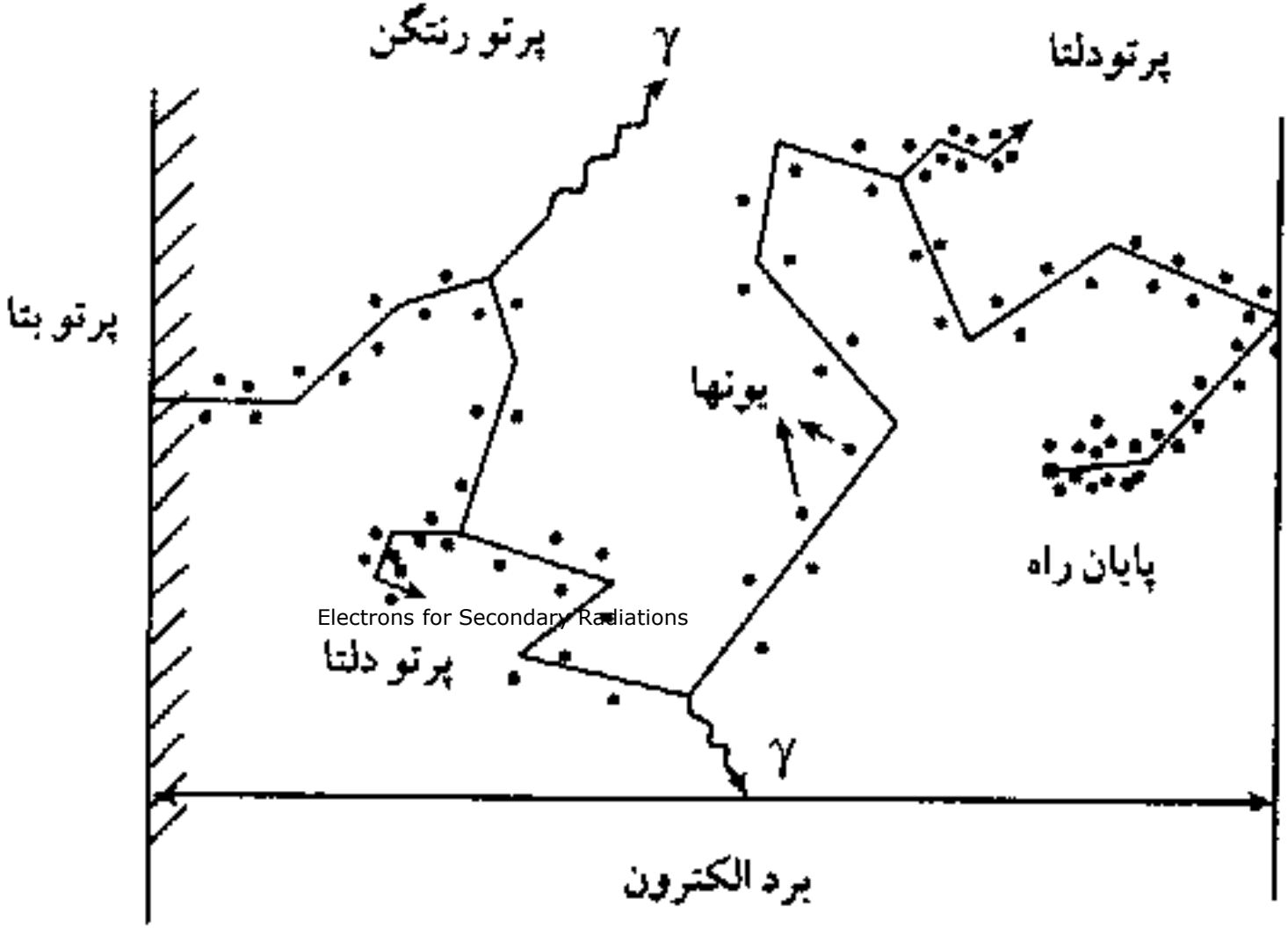
- در این حالت که سرعت کم شده و انرژی آن از دست داده میشود یک فوتون تابش می شود. به فوتون ایجادشده در این پدیده پرتو ترمزی می گویند.

- ذره های بتا می توانند با الکترونهای مداری برخورد نمایند و باعث شود که الکترون مداری اتم را ترک کرده و جفت یون تولید شود (فوتونهای X ویژه).

- فوتونهای رونتگن ویژه هنگام بیرون رفتن از اتم ممکن است با الکترونهای مداری برخورد کرده و آنها را به بیرون پرتاب نمایند اینگونه الکترونها را الکترون سرگردان یا الکترون اوژه می نامند.

- مسیر پیچ در پیچ ذره بتا باعث می شود که برد میانگین آن بسیار کوچکتر از برد حقیقی باشد.
- بیشتر مواد رادیو اکتیوی که در پزشکی به کار می روند، تابش کننده های بتا می باشند.

مسیر و برد الکترون



برخورد پوزیترون با ماده

- با همان روشی که الکترون با ماده برخورد می کند پوزیترون با ماده برخورد نموده و انرژیش را از راه یونش و یا انگیزش از دست می‌دهد
- این کار در مسیری نزدیک به چند میلیمتر انجام می گیرد.
- پس از آن پوزیترون با پاد ذره اش الکترون ترکیب شده و راه نابودی را می پیماید.
- و انرژی الکترو مغناطیسی به گونه زیر تابش می شود.

$$\Delta E = 2m_0c^2 = 1.022MeV$$

برخورد نوترون با ماده

- ۱- کشسان (Elastic):

هنگامی که برخورد با هسته‌ای به اندازه خودش (آب یا پارافین) صورت می‌گیرد انرژی جنبشی آن به هسته منتقل می‌شود و هیچ انرژی از نوترون تابش نمی‌شود. نوترون در این پدیده آهسته می‌شود (نوترون گرمایی).

- ۲- نا کشسان (Inelastic) :

بخشی از انرژی نوترون در برخورد با هسته از دست می‌رود و بخشی بصورت فوتون تابش می‌شود (آهسته شدن نوترون به وسیله کربن).

- ۳- ربایش نوترون (Radiative capture):

نوترون دوباره جذب هسته می شود و همه انرژی آن به هسته منتقل می‌شود و دگرگونی هسته با تابش فوتون یا پرتاب یک یا چند ذره صورت می‌گیرد.

برد ذرات مختلف

(برد میانگین)						
پرتو	نشانه	بار الکتریکی	انرژی	هوا	آب	یونش نسبی ویژه
آلفا	α	+2	3-9 Mev	3 - 9 cm	25 - 45 μm	2500
بتا	β^-	-1	0-3 Mev	0 - 10 cm	5 - 1 mm	100
پوزیترون	β^+	+1	0-3Mev	0 - 10 cm	5 - 1 mm	100
نوترون	n	o	0-10 Mev	1 - 100 m	0 - 1 m	0.1
پرتورنتگن	x	o	10-200 Kev	cm - 20 m	mm - cm	1
پرتوگاما	γ	o	kev-10Mev	cm - 100 m	mm -10 cm	1

(۴)
رادیواکتیویته، قوانین واپاشی، نیمه عمر

تعریف اکتیویته

- **اکتیویته یا فعالیت دگرگونی رادیونوکلئیدها بر حسب شمار اتم های دگرگون شده در یکای زمان (با چشم پوشی از شمار پرتو های تابشی) اندازه گیری می شود.**

- **هسته های رادیو اکتیو می توانند با یک و یا با چند روند دگرگونی شوند. برخی از هسته های رادیو اکتیو تابش کننده بتای خالص هستند و برخی دیگر مانند ^{131}I تابشهای گوناگونی دارند.**
- **^{131}I با تابش پرتو (β) به یکی از پنج حالت انگیخته هسته زنون دختر (Xe) دگرگون شده و پس از آن بگونه ای آنی با تابش های گو ناگون (γ) به حالت پایه ای می رسد.**

تعریف اکتیویته

- تعداد اتمهایی که دگرگون می شوند متناسب با N شمار اتمهای موجود در نمونه است. اگر از N هسته رادیونوکلوئید، تعداد dN هسته پس از گذشت زمان dt واپاشی نماید **رادیواکتیویته** از رابطه زیر بدست می آید:

$$A = \frac{-dN}{dt}$$

- احتمال آماری دگرگونی با یک روند خاص برای یک رادیونوکلوئیدثابت است.

ثابت واپاشی (پایای دگرگونی)

- احتمال واپاشی یک هسته رادیونوکلوئید در واحد زمان با ثابت واپاشی λ (پایای دگرگونی) تعریف می شود و هر رادیو ایزوتوپ (هسته ناپایدار) با ثابت واپاشی خود که ویژگیهای آهنگ دگرگونی آن است شناخته می شود.
- پایای λ نشان دهنده کسری از اتمهاست که در یکای زمان دگرگون می شوند.
- ثابت واپاشی بستگی به فعالیت دگرگون شدن هسته های ناپایدار یا فعالیت پرتو دهی دارد.
- اگر λ احتمال واپاشی یک هسته در واحد زمان باشد. بنابراین:

$$A = \lambda . N$$

قانون نمایی واپاشی

- از ترکیب دو معادله فوق داریم:

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda \times N$$

برای این معادله دیفرانسیل و انتگرال گیری با در نظر گرفتن شمار اتمها در زمان t=0 بصورت N_0 داریم:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

این معادله، فرمول کلی دگرگونی مواد رادیو اکتیو می باشد و شمار هسته های باقی مانده رادر زمان t نشان می دهد.

- شمار هسته های دگرگون شده را پس از گذشت زمان t می توان به سادگی به دست آورد.

$$N' = N_0 - N$$

$$N' = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

محاسبه اکتیویته پس از زمان t

- اگر دو سوی معادله $N=N_0e^{-\lambda t}$ را در پایای λ ضرب کنیم:

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- اگر به جای اکتیویته مطلق, اکتیویته نسبی R (شماره ای که دستگاه شمارنده به ما می دهد) به کار گرفته شود به صورت زیر می باشد.

$$R = R_o e^{-\lambda t}$$

یکای اکتیویته

- یکای پیشین اندازه‌گیری کوری(Ci) نام دارد که برابر 3.7×10^{10} دگر گونی یا فرو پاشی هسته ای در یک ثانیه است. از دید تاریخی کوری برابر نسبت دگر گونی رادون(Rn) در حال تراز مندی با یک گرم رادیوم است.

- یکای اکتیویته در سیستمSI بکرل(Bq) است و آن اکتیویته ماده است که شمار دگرگونیهایش برابر یک دگرگونی در یک ثانیه است.

- کیلو بکرل(KBq) و مگا بکرل(MBq) و ژیگا بکرل (GBq)

اکتیویته ویژه

- مقدار اکتیویته به ازای واحد جرم رادیونوکلوئید را اکتیویته‌ی ویژه آن نمونه‌ی رادیواکتیو می‌نامند و واحد آن برابر با mCi/mg یا MBq/mg (میلی‌گرم/ دقیقه/ فروپاشی) می‌باشد.

- اکتیویته‌ی ویژه‌ی نمونه‌های ناخالص (که دارای سایر ایزوتوپ‌های پایدار نیز هستند)، همیشه کمتر از نمونه‌ی خالص است و تابعی از میزان ناخالصی موجود در نمونه است.

نیمه عمر

- **نیمه عمر فیزیکی یک رادیو نوکلئید و یا ماده رادیو اکتیو مدت زمانی است که در آن اکتیویته به نیمی از اندازه نخست کاهش می یابد.**
- **این زمان با جایگزینی** $A = \frac{A_0}{2}$ **و** $t_{1/2}$ **در** $A = A_0 e^{-\lambda t}$ **و گرفتن لگاریتم به دست می آید.**

- **زمان نیمه عمربا پایای دگرگونی بستگی را دارد.**

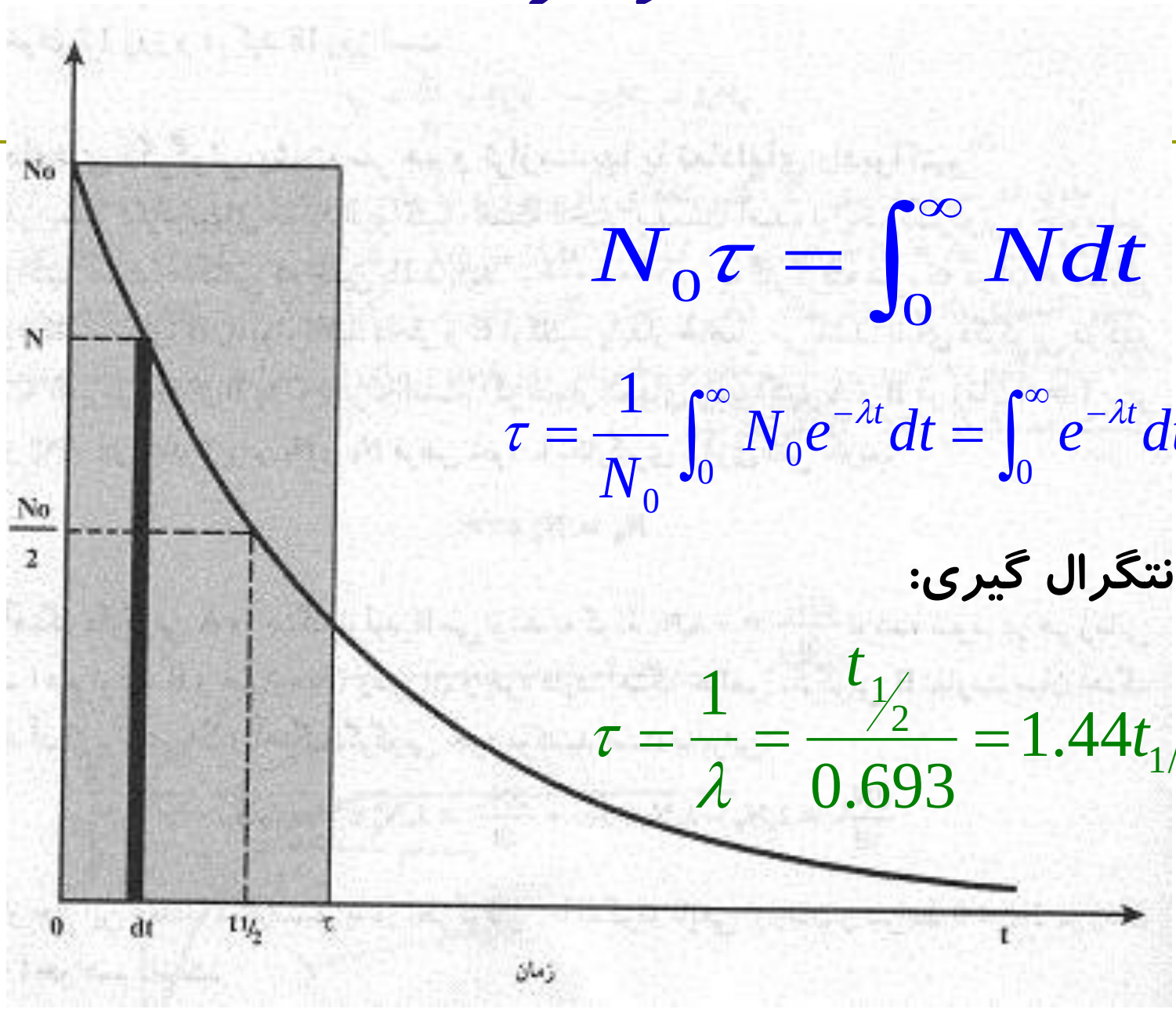
$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

عمر متوسط

- **عمر متوسط** τ **برای بیان دگر گونی رادیو اکتیو و اندازه گیری دوز در بیماران, فاکتور مناسبی می باشد.**
- **چنین فرض می شود که شمار اتمهای رادیو اکتیو** N_0 **تا زمان** τ **ثابت می مانند و پس از این زمان همه با هم دگرگون می شوند.**
- **اندازه** τ **می تواند با برابر قرار دادن سطح زیر منحنی فرضی دگرگونی و سطح زیر منحنی حقیقی دگر گونی به دست آید.**

$$\tau = 1.44 t_{1/2}$$

عمر متوسط



$$N_0\tau = \int_0^\infty N dt$$

$$\tau = \frac{1}{N_0}\int_0^\infty N_0 e^{-\lambda t} dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt$$

پس از انتگرال گیری:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0.693} = 1.44 t_{1/2}$$

نیمه عمر بیولوژیکی

- **نیمه عمر بیو لوژیکی برابر زمانی است که بدن با فعالیت‌های زیستی خود نیمی از ماده رادیو اکتیو وارد شده به بدن را بیرون می راند.**

- **احتمال حذف یک ماده از سیستم بیولوژیک با ثابت λ_{Bio} نشان داده می شود.**
- مقدار باقیمانده دارو پس از زمان t که بر اثر حذف بیولوژیکی کاهش یافته است از معادله ای شبیه رادیواکتیویته بدست می آید.

$$M = M_0 e^{-\lambda_{Bio} t}$$

$$t_{1/2\,Bio} = \frac{0.693}{\lambda_{Bio}}$$

- **نیم عمر زیستی در یک عضو نسبت به عضو دیگر تغییر میکند. برای نمونه نیم عمر زیستی ^{131}I در کبد ۱۴۰ روز است در حالی که نیم عمر زیستی آن در کلیه ۷ روز است.**

نیمه عمر مؤثر

- تأثیر نیم عمر فیزیکی و بیو لوژیکی با یک زمان ویژه که نیمه عمر مؤثر $T_{1/2_{eff}}$ می باشد, نشان داده می شود.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{phy} + \lambda_{Bio}$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phy}} + \frac{1}{T_{bio}} \Rightarrow$$

- بررسی های دوز پرتو بیشتر با بکار گیری نیم عمر مؤثر انجام می شود.

دگرگونی پشت سر هم و
اصول یک ژنراتور رادیونوکلوئید

- دگرگونی های مواد رادیو اکتیو , هسته دختر به دست آمده از یک دگر گونی, خود نیز رادیو اکتیو است. هنگامی که چنین باشد باید:

$$A \xrightarrow{\lambda_a} B \xrightarrow{\lambda_b} C$$

- اگر شمار اتمهای رادیو اکتیو A در زمان t=0 برابر N_a^0 و در زمان t برابر N_a باشد **تعداد اتمهای موجود A** که می توانند به B دگرگون شوند برابرند با:

$$N_a = N_a^0 e^{-\lambda_a t}$$

اکتیویته A و B

- اکتیویته A (یا آهنگ دگر گونی A) در هر زمان: $A_a = \lambda_a N_a$

- اکتیویته A در هر زمان، معادل آهنگ تولید B می باشد اما در هر زمان، هم تولیدB و هم از میان رفتن آن وجود دارد.
- لذا آهنگ خالص دگرگونی B، تفاوت میان آهنگ تولید آن و آهنگ دگرگونی آن است بنابراین:

$$\lambda_a N_a - \lambda_b N_b = \frac{dN_b}{dt}$$

این معادله, برابری ترازمندی یا تعادل رادیو اکتیو میان رادیو ایزوتوپ مادر و دختر است.

با حل این معادله دیفرانسیل، تعداد نوکلئد های باقیمانده دختر N_b برابر است با:

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a^0 (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t})$$

ترازمندی پایدار

- اگر نیم عمر رادیو ایزوتوپ مادر بسیار بزرگتر از نیم عمر رادیوایزوتوپ دختر باشد یعنی $T_{1/2}a >> T_{1/2}b$ (10^4 برابر یا بیشتر)،

دگرگونی رادیو ایزوتوپ مادر در چند نیمه عمر رادیو ایزو توپ دختر می تواند ثابت فرض شود.

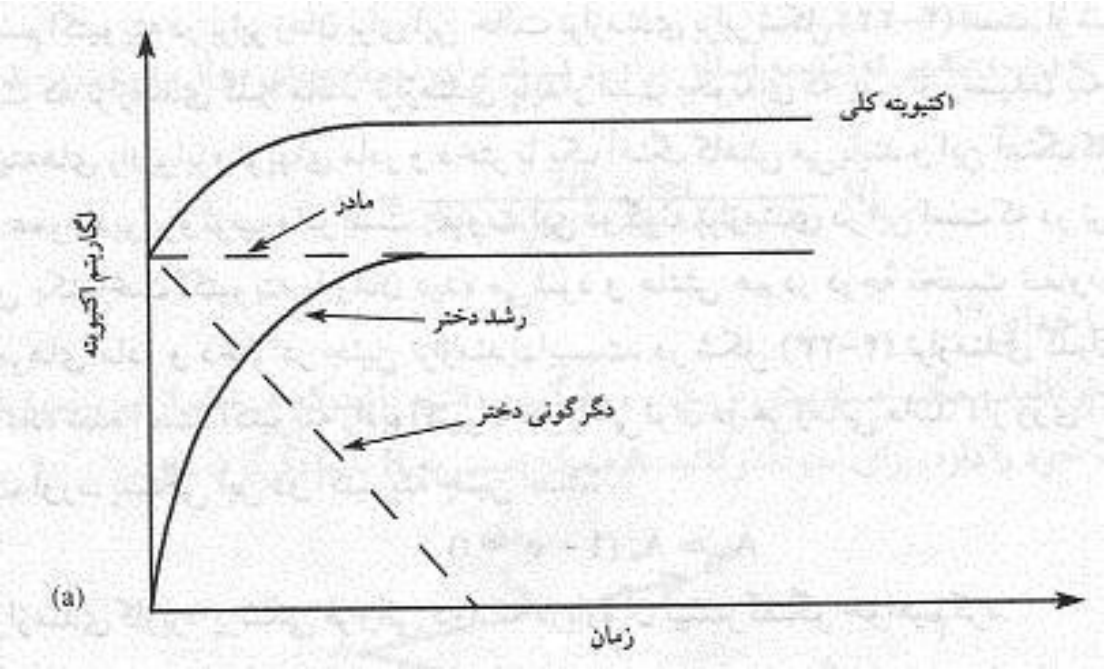
- در این دگرگونی، از معادله ترازمندی دو رادیو ایزوتوپ داریم.

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a^0 (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t})$$

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b} N_a^0 e^{-\lambda_a t} \Rightarrow N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b} N_a \Rightarrow \lambda_b N_b = \lambda_a N_a$$

- پس $A_a = A_b$ خواهد بود.

منحنی ترازمندی پایدار میان مادر و دختر رادیو اکتیو



- مهمترین کاربرد این ترازمندی در چشمه های درمان با $^{226}_{88}Ra$ است که در آن رشد هسته $^{222}_{86}Rn$ با نیم عمر طولانی هسته مادر به دست می آید. این کار باعث به دست آمدن اکتیویته ویژه یکسان در مدت زمان طولانی می گرددکه در پرتو درمانی با ارزش است.

ترازمندی گذرا:

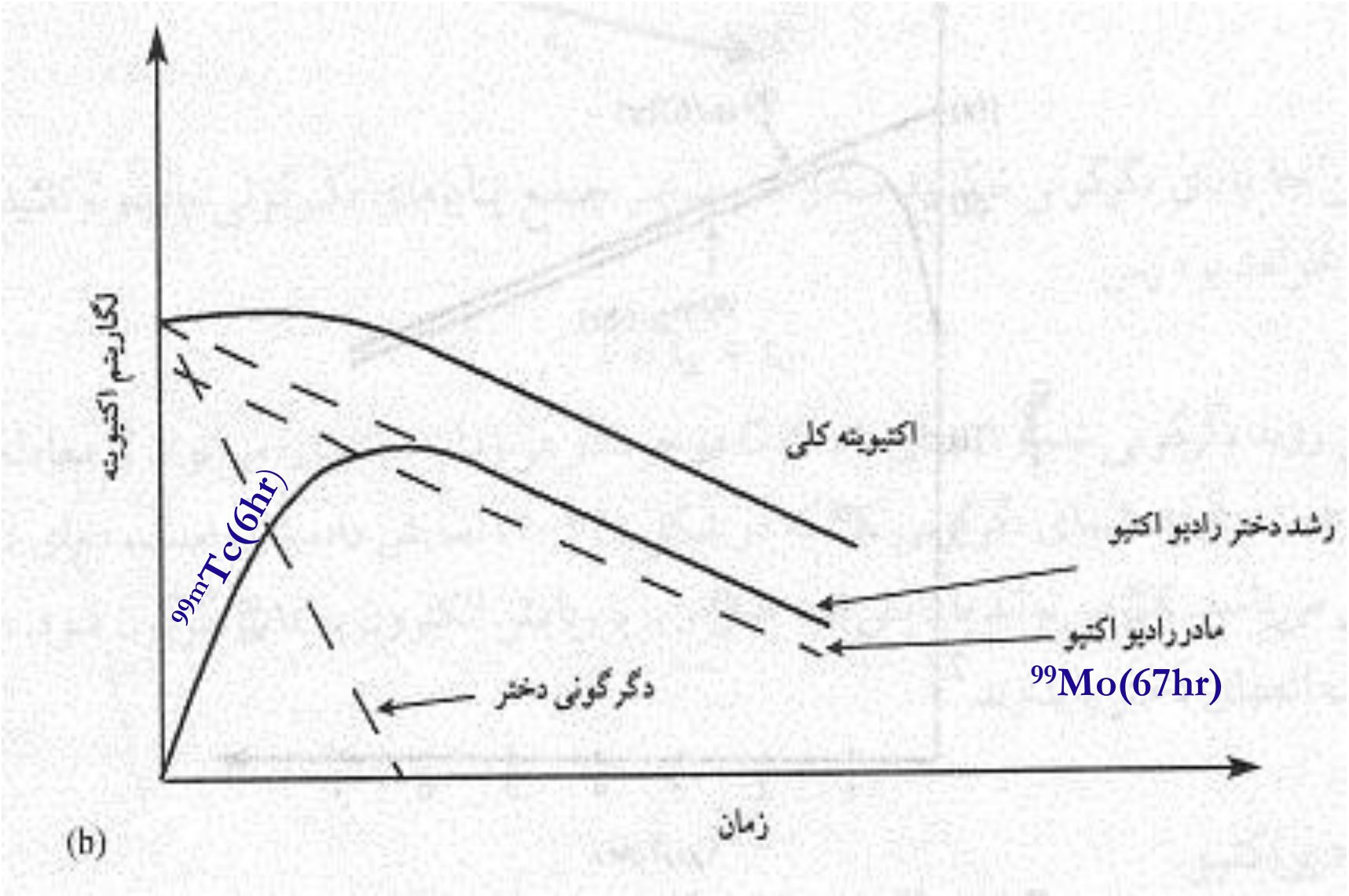
- اگر نیم عمر رادیو نوکلئید مادر از دختر بزرگتر باشد ($T_{1/2a} > T_{1/2b}$) و این بزرگی ده برابر باشد در این حالت λ_a کمی کوچکتر از λ_b خواهد بود.

$$N_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} N_a^0 e^{-\lambda_a t} \Rightarrow \lambda_b N_b - \lambda_a N_b = \lambda_a N_a \Rightarrow$$

$$A_b - \lambda_a N_b = A_a$$

- اکتیویته رادیو اکتیو دختر را می توان در هر زمانی مانند t از روی اکتیویته مادر به دست آورد.
- ترازمندی گذرا مانند تراز مندی پایدار است بگونه ای که پس از رسیدن به ترازمندی، اکتیویته های رادیو ایزو توپهای مادر و دختر با یک آهنگ کاهش می یابند و این آهنگ کاهش, تابعی از نیمه عمر رادیو ایزوتوپ مادر است.

منحنی ترازمندی گذرا میان مادر و دختر رادیواکتیو (ترازمندی گذرای Mo-Tc)



دگرگونی شاخه ای

- یک رادیو نوکائید ممکن است بیش از یک راه دگرگونی داشته باشد.
- پایای دگرگونی نوکلئید مادر λ , برابر جمع پایای دگرگونی رادیو نوکلئید دختر ها خواهد بود.

$$\lambda = \lambda_B + \lambda_C$$